



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**APLICAÇÃO DE FÍSICA DE PLASMA EM
ENGENHARIA AUTOMOTIVA: AQUISIÇÃO E
ANÁLISE SENSORIAL DA CORRENTE IÔNICA EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

**Autor: Roberto Aliandro Varella
Orientador: Rafael Morgado Silva**

**Brasília, DF
2013**



ROBERTO ALIANDRO VARELLA

**TÍTULO: APLICAÇÃO DE FÍSICA DE PLASMA EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA:
AQUISIÇÃO E ANÁLISE SENSORIAL DA CORRENTE IÔNICA EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva

Orientador: Professor Doutor Rafael Morgado Silva

Co-Orientador: Professor Doutor Paolo Gessini

**Brasília, DF
2013**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Varella, Roberto A..

Aplicação de física de plasma em engenharia
automotiva: aquisição e análise sensorial da corrente
iônica em motores de combustão interna / Roberto
Aliandro Varella. Brasília: UnB, 2013. 103 p. : il. ; 29,5
cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Rafael
Morgado Silva.

1. Corrente Iônica. 2. Motores de Combustão Interna. 3. Análise
Sensorial I. Morgado Silva, Rafael. II. PhD.


CDU Classificação




**APLICAÇÃO DE FÍSICA DE PLASMA EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA:
AQUISIÇÃO E ANÁLISE SENSORIAL DA CORRENTE IÔNICA EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA**

Roberto Aliandro Varella

Monografia submetida como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 11/12/13 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:



Prof. (PhD): Rafael Morgado Silva, UnB/ FGA
Orientador



Prof. (PhD): Paolo Gessini, UnB/ FGA
Membro Convidado



Prof. (PhD): Alessandro Borges, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2013

Aos meus grandes professores da vida,
meus pais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de muita perseverança e conhecimento adquirido por pelo menos 5 anos trabalhando com motores de combustão interna. Agradeço ao Professor da Universidade de Brasília – Faculdade do Gama, Rafael Morgado Silva, meu orientador, por ter me dado a oportunidade de poder sair um pouco do espectro da engenharia teórica e expandir a minha mente em relação ao meu pensamento criativo, de forma a integrar a base teórica de sala de aula com a prática, esta última tão escassa nos cursos de engenharia pelo Brasil. Também o agradeço por ter me passado parte de seu vasto conhecimento e me apoiado nesse trajeto de forma profissional e pessoal.

Outra pessoa importante em todo esse processo acadêmico foi o Professor Paolo Gessini da Universidade de Brasília – Faculdade do Gama. O Professor Gessini sempre demonstrou o seu apoio ao projeto e deu suporte com suas ideias, fazendo com que o trabalho se tornasse mais fácil e objetivo.

Com ambos, a relação aluno-professor extrapolou os limites de sala de aula e de orientação para uma relação fraternal, a qual tenho certeza que permanecerá por muito tempo. Então, agradeço aos meus amigos Rafael e Paolo por todos esses anos de amizade que foram de fundamental importância para a minha constante evolução com ser humano.

Este trabalho teve uma atuação ativa do técnico do Laboratório de Máquinas Térmicas da Faculdade de Tecnologia da UnB, Eurípedes Rodrigues de Oliveira, mais conhecido como “Mestre”. Essa pessoa foi, além de um grande mentor, quase um coautor deste projeto. Foi um verdadeiro companheiro de trabalho, abdicando do seu horário de expediente para auxiliar e participar dos testes. Foi de fundamental importância para o andamento do trabalho, chegando a desenvolver um projeto paralelo para que o todo o sistema funcionasse como esperado. Então fica aqui a minha gratidão a ele.

Além do apoio técnico e fraternal dos professores e técnicos envolvidos, o maior apoio foi o familiar. Esse trabalho é dedicado principalmente aos meus pais. Eles sempre mostraram apoio incondicional aos meus projetos de vida e me ensinaram a batalhar pelos meus objetivos, focar em meus ideais, respeitar o próximo e, principalmente se respeitar. Se não fosse pela educação, caráter e amor que me transmitiram provavelmente eu não teria alcançado o que fiz, desde a admissão à UnB quanto durante a capacitação profissional e, também no futuro que me aguarda.

Também gostaria de agradecer a minha namorada Clarice, que desde o início dessa jornada me apoiou e me auxiliou, com todo o seu amor e carinho.

Um agradecimento especial também aos meus amigos pessoais e de curso que me apoiaram por muito tempo e continuam fiéis a amizade e a irmandade que existe entre nós.

“Só o conhecimento liberta o homem. Só através do conhecimento o homem é livre, e em sendo livre ele pode aspirar uma condição de vida melhor para ele e para todos os seus semelhantes.”

Dr. Enéas Carneiro (1991)

RESUMO

A corrente iônica é uma corrente elétrica gerada pelo fluxo de íons. Este fluxo pode ser o resultado tanto de efeitos hidrodinâmicos quanto de campos elétricos e magnéticos. No caso de um motor de combustão interna, há a formação de íons quando a mistura de ar e combustível entra em combustão, pois a temperatura elevada transforma o gás da câmara de combustão em um plasma.

A vela de ignição é um dispositivo elétrico que tem a função de inflamar a mistura comprimida de ar/combustível por meio de um feixe plasmático, também chamado de centelha elétrica. Esse feixe plasmático é gerado através de uma tensão elétrica criada por uma bobina que passa pelo corpo da vela de ignição. Devido a propriedades de continuidade de circulação da corrente elétrica nos circuitos indutivos, se solta a centelha, provocando a explosão da mistura dentro do cilindro do motor. Essa centelha é uma passagem de corrente elétrica entre os eletrodos, sendo eles de materiais diferentes.

Após a centelha, o gás no interior da câmara de combustão se transforma em um plasma, que possui menor resistência à passagem da corrente elétrica. As propriedades do plasma, como pressão e temperatura, influenciam sua resistência elétrica. Sendo assim, ao se medir esta resistência é possível inferir as propriedades do plasma.

A principal ideia desse trabalho é utilizar a vela de ignição de um motor de combustão interna como um sensor da resistividade do plasma na câmara de combustão. Para isto, após a centelha, submetem-se os eletrodos da vela a uma pequena diferença de potencial, formando uma corrente iônica entre os eletrodos da vela, cuja intensidade depende fortemente das propriedades do plasma na câmara de combustão.

Assim, pretende-se entender melhor alguns fenômenos e dados do funcionamento do motor de combustão interna, como a detonação, definição da fase de ignição, captação da razão volumétrica e estequiométrica da mistura, e outros.

Palavras-chave: 1. Corrente Iônica. 2. Motores de Combustão Interna. 3. Análise Sensorial

ABSTRACT

The ionic current is an electric current generated by the flow of ions. This flux flow may be a result of hydrodynamic effects as both of electric and magnetic fields. In the case of an internal combustion engine, there is the formation of ions when the air-fuel mixture combusts, because the higher temperature transform the gas from the combustion chamber into a plasma.

The spark plug is an electrical device which has the function of igniting the compressed mixture of air / fuel through a plasma beam, also called electric spark. This plasma beam is generated by an electric voltage, created by a coil, which passes through the body of the spark plug. Due to the properties of continuous electric current flow in inductive circuits, the spark is released, causing the explosion of the mixture within the engine cylinder. This spark is a passage of electrical current between the electrodes, made from different materials.

After the spark, the gas inside the combustion chamber becomes plasma, which has lower resistance to the passage of electric current. The properties of plasma, such as pressure and temperature, affect its electrical resistance. Therefore, when measuring this resistance is possible to infer the properties of the plasma.

The main idea of this work is to use the spark plug of an internal combustion engine as a sensor of the plasma resistivity in the combustion chamber. For this, after the spark, undergo the electrodes of the spark plug to a small potential difference, forming an ionic current between the electrodes of the spark plug, whose intensity depends strongly on the properties of the plasma in the combustion chamber.

Thus, it is intended to better understand some phenomena data and the operation of the internal combustion engine, such as knock, definition of the ignition phase, capture of the volumetric ratio and stoichiometric ratio of the mixture, and others.

Keywords: 1. Ion Current. 2. Internal Combustion Engines. 3. Sensorial Analysis

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
SUMÁRIO	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	12
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS.....	17
2.1. O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	17
2.1.1 Ciclos Termodinâmicos Principais:	19
2.2. IGNIÇÃO DE MOTOR A CENTELHA:	21
2.2.1 Características da Centelha de Ignição	21
2.2.2 Combustão da Mistura e Energia de Ignição:	22
2.2.3 Ponto de Ignição	23
2.2.4 Regulagem de detonação	24
2.3. SISTEMAS DE IGNIÇÃO	25
2.3.1 Ignição por Bobina (indutiva)	25
2.3.2 Ignição por Descarga Capacitiva (HKZ).....	26
2.4. BOBINA DE IGNIÇÃO	27
2.4.1 Constituição	27
2.4.2 Funcionamento.....	28
2.4.3 Tipos	29
2.5. A VELA DE IGNIÇÃO.....	31
2.5.1 Exigência de Funcionamento	31
2.5.2 Concepção	33
2.5.3 Índice Térmico.....	34
2.5.4 Relação da Distância Entre Eletrodos e Tensão de Ignição	35
2.5.5 Posição da Centelha	36
2.5.6 Desgaste dos Eletrodos	36
2.5.7 Regimes de Funcionamento Anormais da Vela de Ignição.....	37
2.6. O CONTROLE DA IGNIÇÃO.....	39
2.6.1 <i>Timing</i> da Ignição e Seu Controle.....	39
2.7. PRESSÃO INTERNA DO CILÍNDRIO	41
2.7.1 Relação Entre o Avanço da Ignição e a Pressão Interna do Cilíndro	41
2.7.2 Pico de Pressão	42
2.8. LIMITES DE DESEMPENHO POR COMBUSTÃO ANORMAL.....	43
2.8.1 Pré-Ignição.....	43
2.8.2 Auto-Ignição	43
2.8.3 Detonação.....	43
2.9. CORRENTE IÔNICA.....	45
2.9.1 Importância da Medição da Corrente Iônica	45
2.9.1.1 <i>Background</i> do Sensoriamento Iônico.....	46

2.9.2	Sensoriamento Iônico.....	46
2.9.3	Sinal da Corrente Iônica.....	48
3	OBJETIVOS.....	49
4	METODOLOGIA.....	50
4.1.	MOTOR UTILIZADO	51
4.2.	CONVERSÃO DE BOBINA ELETRÔNICA CONVENCIONAL PARA BOBINA COMPACTA POR CILÍNDRIO	54
4.2.1	Circuito de comando de ignição	54
4.2.2	Escolha da bobina de ignição e testes do sistema	55
4.3.	CIRCUITO DE AQUISIÇÃO DE CORRENTE IÔNICA.....	59
4.2.1	Idealização	59
4.2.2	Simulação	62
4.2.3	Montagem	63
4.3.	BANCADA DE TESTES.....	65
4.4.	METODOLOGIA DOS ENSAIOS	67
5	RESULTADOS E ANÁLISE	68
5.1.	AQUISIÇÃO DA CURVA DE CORRENTE IÔNICA.....	68
5.2.	ANÁLISE DA FASE DE FRENTE DE CHAMA.....	70
5.3.	ANÁLISE DA FASE PÓS-FRENTE DE CHAMA	71
6	CONCLUSÃO.....	77
	Bibliografia.....	80

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Motor de Combustão Interna Alternativo	17
Figura 2	Nomenclatura da posição do pistão	18
Figura 3	Motor 4 tempos	18
Figura 4	Ciclo Diesel Teórico – Gráfico Pressão-Volume	19
Figura 5	Ciclo Otto Teórico – Gráfico Pressão-Volume	20
Figura 6	Motor a centelha	21
Figura 7	Ignição Indutiva	26
Figura 8	Visão explodida de uma bobina compacta	28
Figura 9	Bobina Compacta e Bobina “Caneta”	29
Figura 10	Tipos de bobina, respectivamente bobina asfáltica (acima, esquerda), bobina plástica (acima, direita), bobina compacta (abaixo, esquerda) e bobina “caneta” (abaixo, direita)	30
Figura 11	Velas de Ignição	31
Figura 12	Curva característica da Tensão de ignição	32
Figura 13	Vela de Ignição	33
Figura 14	Comportamento de temperatura das velas de ignição	34
Figura 15	Exemplo de vela gasta.....	37
Figura 16	MBT em função do ângulo de ignição.....	40
Figura 17	Gráfico de pressão no cilindro em função do ângulo do virabrequim com diferentes tempos de ignição	41
Figura 18	Gráfico de pressão demonstrando o PPP	42
Figura 19	Esquemático de sensoriamento de corrente iônica	47
Figura 20	Esquema comercial já existente de medição de corrente iônica	47
Figura 21	Sinal característico da corrente iônica de um ciclo de ignição	48
Figura 22	Imagem do motor utilizado montado em bancada de dinamômetro	52
Figura 23	Curva característica de torque do motor utilizado	52
Figura 24	Circuito montado e sensor de posição utilizado	54
Figura 25	Bobinas Bosch nº 0 221 504 014 e Renault nº 7700875000	56
Figura 26	Curva de torque do motor utilizando 3 tipos de bobinas	57
Figura 27	Bobinas instaladas no motor	58
Figura 28	Diagrama do circuito de ignição no programa LT Spice	59
Figura 29	Circuito da Ignição	60
Figura 30	Circuito da Bobina de Ignição	60
Figura 31	Circuito da Vela de Ignição	61
Figura 32	Circuito do Sensor Iônico	61
Figura 33	Sinais adquiridos através de simulação do circuito iônico e do comportamento da vela de ignição, respectivamente.....	62
Figura 34	Circuito de sensoriamento de corrente iônica (protoboard)	64
Figura 35	Circuito de sensoriamento de corrente iônica (final).....	64
Figura 36	Osciloscópio Digital modelo Tectronix TDS 2012 de 100MHz	65
Figura 37	Diagrama esquemático do teste de aquisição da corrente iônica	65
Figura 38	Osciloscópio portátil (Minipa Miniscope) para testes do sistema de ignição e bancada de testes – sala do dinamômetro, respectivamente.....	66
Figura 39	Ferramentas utilizadas.....	66
Figura 40	Bancada de testes – sala de controle	66
Figura 41	Vala utilizada calibrada para GAP = 1mm.....	67
Figura 42	Curva adquirida pelo osciloscópio.....	68
Figura 43	Curva adquirida plotada.....	69
Figura 44	Fase de frente de chama da curva adquirida	70
Figura 45	Fase de pós-frente de chama da curva adquirida	71
Figura 46	Gráfico Tensão de Pico X RPM	74
Figura 47	Gráfico Tempo de Pico X RPM	74
Figura 48	Curva característica de torque para cada GAP	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Informações fornecidas e medidas do motor utilizado	53
Tabela 2	Resultado dos testes de tensão das bobinas	56
Tabela 3	Desvio padrão médio para cada sistema.....	57
Tabela 4	Dados do tempo e tensão de pico por rotação e GAP.....	73
Tabela 5	Dados médios do tempo e tensão de pico e desvios padrão de cada faixa de aquisição por GAP.....	73
Tabela 6	Dados de torques por RPM e GAP.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

P	Pressão	[Pa]
V	Volume	[cm ³]
Q	Calor	[J]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[°C]
C	Curso	[mm]

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISSO	International Organization for Standardization
ICE	“Internal Combustion Engine” – Motor de Combustão Interna
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
GAP	Abertura da Vela de Ignição
ECU	“Engine Control Unit” – Unidade de Controle do Motor
SAE	“Society of Automotive Engineers” – Sociedade de Engenheiros Automotivos
MBT	“Maximum Brake Torque”
PPP	Posição de Pico de Pressão
GAP	Abertura da Vela de Ignição

1. INTRODUÇÃO

O motor de combustão interna tem sido amplamente utilizado desde a sua criação no século XIX, sendo que a sua principal utilização se dá em veículos automotores. Desde a crise do petróleo de 1970, o foco dos desenvolvedores de motores se deu para a melhoria do consumo do veículo e para a redução da emissão de gases poluentes provenientes da combustão realizada nos motores. Em 1980, a introdução da eletrônica veicular através da ignição eletrônica e dos sistemas eletrônicos de injeção de combustível possibilitou uma amplificação no controle do motor, abrindo novas fronteiras para o desenvolvimento do mesmo. Uma das limitações encontradas no desenvolvimento do controle do motor é relativa a informações sobre a combustão.

Com a demanda de economia de combustível, o desenvolvimento de motores com maior eficiência foi mais instigado, o que trouxe tecnologias nas áreas relacionadas ao tempo ignição e de estimativa da quantidade de combustível necessária para certo padrão operacional. Com a demanda de redução de emissões, houve um impulso nos desenvolvimentos de sistemas os quais controlam a razão ar-combustível, detectam falhas na ignição e problemas na mistura. Sensores de oxigênio alocados no tubo de escape possibilitam uma capacidade de controle por malha fechada da razão ar-combustível e sensores piezoelétricos montados no bloco do motor servem para um controle da detonação. Entretanto, esses sistemas não se dão mais suficientes para a elevada demanda do desenvolvimento de controle do motor.

Assim, três métodos existem para o monitoramento da combustão [10]:

- . Sensoriamento da pressão interna do cilindro através de um sensor de pressão inserido na câmara de combustão;
- . Sensoriamento da corrente iônica através da vela de ignição;
- . Instrumentação ótica, que inclui câmaras de TV e lasers que apontam alguma parte transparente na cabeça ou parede do cilindro.

Os equipamentos óticos utilizados são muito caros e são somente operacionais em ambientes laboratoriais. Já o sensor de pressão é muito utilizado para medições relativas a

determinação da qualidade da combustão relacionando com a pressão do cilindro. É muito utilizado laboratorialmente devido ao seu alto custo e ao tempo de vida-útil operacional. Já o caso do sensoramento da corrente iônica se dá de maneira mais prática, pois não necessita de modificações na estrutura do motor, e com menor custo, pois utiliza componentes já existentes e necessários para o funcionamento do motor.

A corrente iônica é uma corrente elétrica gerada pelo fluxo de íons. Este fluxo de íons pode ser o resultado tanto de efeitos hidrodinâmicos quanto de campos elétricos e magnéticos. No caso de um motor de combustão interna, há a formação de íons quando a mistura de ar e combustível entra em combustão, pois a temperatura elevada transforma o gás da câmara de combustão em um plasma.

Para um motor a centelha, a vela de ignição pode ser usada como sensor com uma adição de uma eletrônica embarcada adicionada ao sistema de ignição. Esse método se torna relativamente mais barato, quando comparado aos outros, e pode substituir outros sensores. O uso deste método auxilia a detecção da detonação no cilindro e de falhas da ignição, tanto como de parâmetros, por exemplo, fase do motor, pico máximo de pressão e tempo de ignição, entre outros. Ao se obter esses dados, abre-se uma possibilidade de maior compreensão da combustão no motor e permite uma possibilidade de controle da combustão, otimizando a eficiência e reduzindo as emissões, algo que é de difícil conciliação na calibração e certificação de motores.

Pesquisas nessa área objetivam a procura de informações na corrente iônica e já contam resultados promissores. Porém, a interpretação e o entendimento dessas informações ainda estão em crescente desenvolvimento. Por isso, este trabalho irá se focar na aquisição e interpretação do sinal da corrente iônica, adicionando uma informação preciosa tanto para desenvolvedores de sistemas automotivos quanto para a área da simulação e interpretação de sinais da corrente iônica.

2. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

2.1 O MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA [21]:



Figura 1. Motor de Combustão Interna Alternativo [24]

O Motor de Combustão Interna (ICE – “*Internal Combustion Engine*”) é uma máquina térmica que, basicamente, transforma a energia advinda de uma reação química em energia mecânica através de uma mistura de combustíveis (no caso mais utilizado, hidrocarbonetos) admitida para o interior de uma câmara de combustão, onde é queimada.

Em geral, quando se fala em Motores de Combustão Interna, podemos dividi-los em dois tipos básicos: os motores alternativos (volumétricos) e motores rotativos (máquinas de fluxo). Este estudo está focado para os Motores de Combustão Interna Alternativos.

Esses tipos de motores trabalham com diversos tipos de ciclos. Em relação ao curso do pistão, quando um ICE trabalha com dois cursos por ciclo, ele é chamado de motor Dois Tempos. Quando ele trabalha com quatro cursos por ciclo ele é chamado de motor quatro Tempos. Um ciclo do ICE 4 tempos, o qual é o foco deste trabalho, funciona com quatro os quatro cursos a seguir:

- Admissão: A válvula de admissão abre, e o pistão se movimenta para o Ponto Morto Inferior (PMI), admitindo uma carga de ar, ou uma pré-mistura de ar e combustível;
- Compressão: As válvulas são fechadas e o pistão se movimenta para o Ponto Morto Superior (PMS) do cilindro. Quando o pistão se aproxima do PMS, a ignição ocorre;
- Expansão: A combustão se propaga, devida à carga, aumentando a pressão e a temperatura e forçando o pistão para baixo. No final da expansão, ou seja, no PMI, a válvula de exaustão se abre e os gases oriundos da combustão começam a ser expelidos;
- Escape: A válvula de exaustão continua aberta, e enquanto o pistão se movimenta para o PMS o resto do gás oriundo da combustão é expelido. No final do escape, quando a válvula de escape fecha, algum gás residual ainda restará no cilindro. Isto irá diluir a próxima carga.

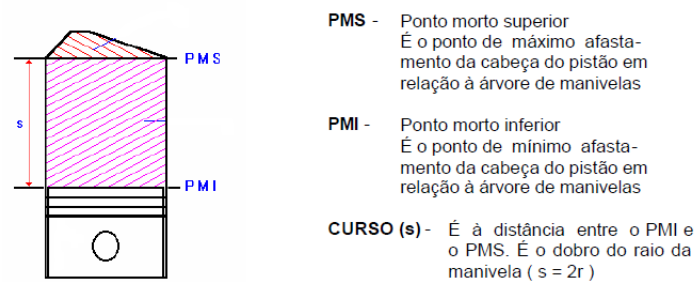


Figura 2. Nomenclatura da posição do pistão [16]

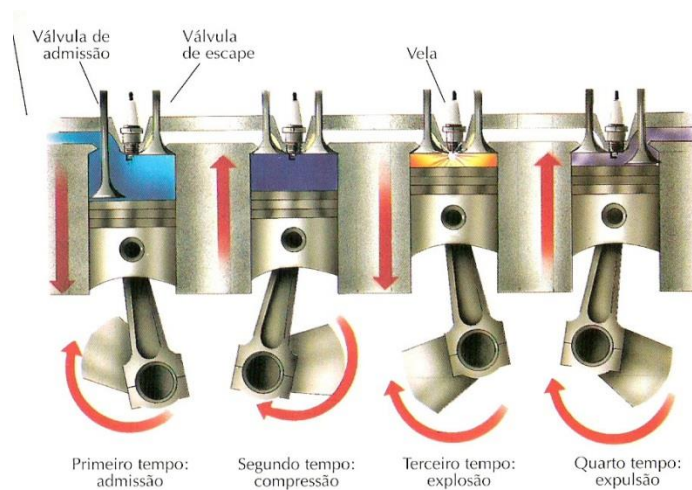


Figura 3. Motor 4 tempos [16]

Assim foram desenvolvidos vários tipos de ciclo, alternando em algumas características.

2.1.1 Ciclos Termodinâmicos Principais [20]:

- Ciclo Diesel: Este ciclo tem adição de calor a pressão constante, ao invés de de adição de calor em volume constante (ciclo Otto). Com uma combinação de uma alta razão de compressão, para causar uma auto ignição do combustível, e uma combustão a volume constante, os picos de pressão podem ser muito altos. Na grande maioria dos motores de ignição por compressão a injeção de combustível é arranjada para que a combustão ocorra em aproximadamente pressão constante para limitar os picos de pressão.

O processo é dado de forma ideal conforme a descrição:

- 1-2 Compressão isotrópica do ar;
- 2-3 Adição de calor a pressão constante enquanto o volume expande;
- 3-4 Expansão isotrópica do ar até o volume original;
- 4-1 rejeição do calor a volume constante para completar o ciclo.

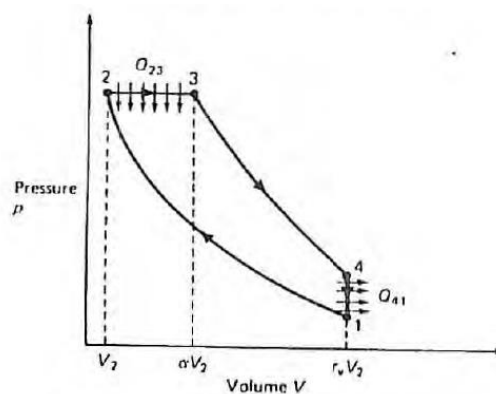


Figura 4. Ciclo Diesel Teórico – Gráfico Pressão-Volume [21]

- Ciclo Otto: Este ciclo é usualmente utilizado como uma base de comparação para um motor de ignição por centelha e um motor de ignição por compressão de alta velocidade. O ciclo consiste em quatro processos definidos. A compressão e a expansão são assumidos como adiabáticos e reversíveis, e assim isentrópicos, o processo segue como o descrito abaixo:

1-2 – Compressão isentrópica do ar ;

2-3 – Adição de calor a volume constante;

3-4 – Expansão isentrópica do ar para o volume original;

4-1 – Rejeição do calor a volume constante, completando o ciclo.

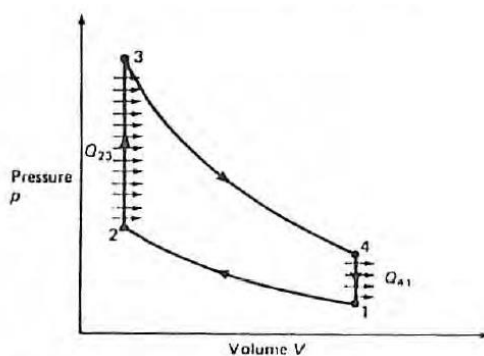


Figura 5. Ciclo Otto Teórico - Gráfico Pressão-Volume [21]

Este trabalho foca nos motores a centelha para a análise. Assim, se torna interessante o estudo do funcionamento a ignição de Motores de Combustão Interna Alternativos com ignição a centelha.

2.2 IGNIÇÃO DE MOTOR A CENTELHA [22]:

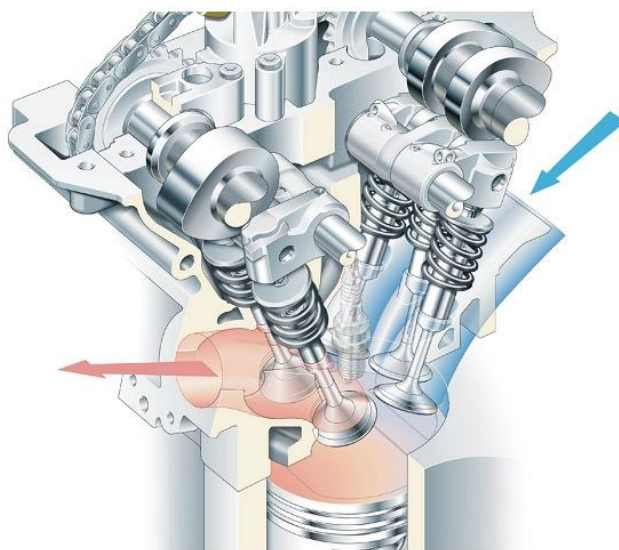


Figura 6. Motor a centelha [16]

No motor de ciclo Otto, é necessária uma ignição, gerada de uma fonte externa para inflamar a mistura e gerar o processo de combustão. A função da ignição é inflamar a mistura ar-combustível quando sob compressão em um exato ponto (antes do PMS). E, para o caso de motores de ciclo Otto, isto se dá por meio de uma faísca elétrica gerada por uma diferença de potencial que passa pelos eletrodos de uma vela de ignição, a qual seus terminais são localizados na câmara de combustão.

É de extrema importância que a ignição esteja funcionando de forma segura, pois isto leva a um funcionamento eficiente do motor. Entretanto falhas na ignição levam a falhas no motor. Entre elas, as mais comuns são falhas na combustão, danificação do catalisador, valores ruins de emissões, consumo de combustível elevado, menor potência efetiva no motor.

2.2.1 Características da Centelha de Ignição [9]:

Uma centelha ou faísca elétrica na vela de ignição somente ocorre quando a tensão de ignição necessária for ultrapassada. A tensão de ignição está em função da abertura (GAP) entre os eletrodos da vela de ignição e da densidade da mistura ar-combustível no ponto de

ignição. Após o salto da centelha, a tensão na vela cai para a tensão de queima. Neste momento, uma corrente iônica é criada. Vale ressaltar que a tensão de queima depende do comprimento do plasma da centelha.

A corrente iônica é uma corrente elétrica gerada pelo fluxo de íons. Este fluxo de íons pode ser o resultado tanto de efeitos hidrodinâmicos quanto de campos elétricos e magnéticos. No caso de um motor de combustão interna, há a formação de íons quando a mistura de ar e combustível entra em combustão, pois a temperatura elevada transforma o gás da câmara de combustão em um plasma.

2.2.2 Combustão da Mistura e Energia de Ignição [23]:

Um plasma de alta temperatura é gerado pela centelha elétrica entre os eletrodos da vela de ignição. Assim, uma frente de chama é formada pelo núcleo da centelha, propagando uma frente de chama que age em relação à mistura na vela de ignição e do fornecimento necessário de energia pelo sistema de ignição.

Como a função da ignição é garantir o processo de queima do motor em todas as condições de funcionamento, desde que a mistura possua uma composição estequiométrica e homogênea, para a inflamação da mistura é necessária uma energia de cerca de 0,2mJ por ignição individual. Uma parte da energia da centelha é convertida no salto e outra na fase de queima.

Para uma distância maior entre os eletrodos, um arco maior irá se formar, o que necessita de tensões de ignição maiores. Isso auxilia as misturas pobres a entrar em combustão, pois a quantidade maior de ar na concentração da mistura, faz com se necessite de tensões de ignição maiores. Com o aumento da tensão de ignição, em um dado nível de energia, a duração da faísca diminui. Entretanto, uma duração mais prolongada da faísca geralmente estabiliza a combustão. As não homogeneidades na mistura, quando no ponto de ignição, também podem ser compensadas com uma maior duração da centelha. Turbulências na mistura podem deflexionar a centelha até a ruptura. Assim são necessárias faíscas sequenciais para que a combustão novamente ocorra na mistura.

Então, é necessária tanta energia de ignição que a mistura ar-combustível possa inflamar com precisão em todas faixas de funcionamento do motor. A energia das centelhas de um sistema de ignição normalmente se encontram na faixa aproximada de 30 a 100 mJ.

2.2.3 Ponto de Ignição [24]:

O Ponto de Ignição é o momento em que a mistura entra em combustão no cilindro do motor. Assim, através da seleção do ponto de ignição pode-se realizar o controle da combustão. Ele é sempre referenciado ao ponto morto superior (PMS) do motor. Assim, podemos dizer que existem pontos de ignição adiantados ou atrasados em relação ao PMS. O ponto mais adiantado possível é determinado pelo limite de detonação, enquanto o ponto mais atrasado é determinado pela máxima temperatura permitida dos gases de escape ou pelo limite de combustão. Esse ajuste influencia no torque desenvolvido pelo motor, as emissões de gases e o consumo de combustível.

Para determinar ponto de ignição básico deve-se levar em conta a velocidade de propagação frente de chama na câmara de combustão, a qual aumenta com maior enchimento do cilindro e maior rotação. Então, para se ter disponível o máximo torque do motor, a máxima pressão de combustão deve estar logo após o PMS.

Entretanto, o ponto de ignição deverá ser adiantado para uma mistura pobre, pois a frente de chama irá se propagar lentamente. Este ajuste depende basicamente da rotação, enchimento da câmara de combustão e relação de ar na mistura.

Os pontos de ignição são geralmente determinados em testes em dinamômetros de bancada e, para os sistemas atuais, armazenados em mapas característicos em centrais de gerenciamento eletrônico (ECU).

Para que o controle eletrônico da ignição realize correções no ponto de ignição, além da rotação e do enchimento do cilindro, também se leva em consideração a regulação da detonação. Assim, faz-se uma análise através de ângulos de ignição ou de mapas característicos especiais para faixas de funcionamento do motor.

Outros fatores de atenção para o ponto de ignição são a influencia dos gases de escape e do consumo de combustível. Como esses dois fatores são antagônicos, ou seja, quando há uma ignição mais adiantada ocorre aumento de potência e redução do consumo, mas ocorre

maior emissão de hidrocarbonetos e dióxido de carbono; quando há uma ignição atrasada, a temperatura do gás de escape sobe, tendo o comportamento inverso da combustão adiantada, o gerenciamento eletrônico da ignição é otimizada em função da rotação, carga, temperatura e outras grandezas de influência, obtendo um comportamento mutuamente equilibrado.

2.2.4 Regulagem de detonação [23]:

A detonação é a autoignição brusca de toda uma grande massa de mistura ainda não queimada na câmara de combustão. Com o avanço da chama principal a partir da vela, a mistura ainda não atingida sofre um processo de compressão e de aquecimento, podendo alcançar em todos os pontos a temperatura de autoignição do combustível. Se a chama principal varrer essa mistura antes de decorrer o retardamento químico da combustão, então a combustão será normal. Em caso contrário, esta porção de mistura irá explodir repentinamente, a volume constante, provocando um aumento muito brusco da pressão, com a consequente propagação de ondas de choque. Essas ondas de choque podem danificar o motor e gerar o famoso som do “bater de pino”, característico da detonação.

Assim, para o controle da ignição, se utiliza um parâmetro de segurança chamado limite de detonação. Logo, mesmo para os casos mais sensíveis a detonação, como relação a tolerâncias, desgaste, qualidade do combustível, o sistema de gerenciamento deve manter um parâmetro para se evitar a detonação, realizando ajustes quando necessário.

Então, a regulagem da detonação trabalha no avanço e atraso do ponto em cada cilindro, de modo que a mistura não entre em autoignição. Isso também ajuda o motor a trabalhar em todas faixas de funcionamento durante a sua vida útil, com o seu limite de detonação e um grau de eficiência mínimo.

O sistema convencional de regulagem de detonação é constituído em um sensor de detonação, um sistema de avaliação do sinal, um sistema de reconhecimento da detonação e um sistema de regulagem do ângulo de ignição. Atualmente, outros sistemas foram desenvolvidos, como o sistema de sensoriamento iônico aqui estudado.

2.3 SISTEMAS DE IGNIÇÃO [23]

Existem vários tipos de sistemas de ignição. Geralmente, em veículos modernos, os sistemas de ignição são integrados como subsistemas em uma unidade de controle do motor (ECU – “*Engine Control Unit*”) integrada. A ignição por bobina ou indutiva com um circuito de ignição individual por cilindro é cada vez mais comum em aplicações automotivas. Outros tipos de ignição são, por exemplo, as ignições de alta tensão capacitivas. Ambos os sistemas são considerados sistemas de ignição eletrônicos.

Também existem os sistemas de ignição de distribuição convencional (que utilizam distribuidor com platinado). A descrição destes tipos de sistemas pode ser facilmente encontrada em literaturas especializadas.

2.3.1 Ignição por Bobina (indutiva) [23]

O circuito de uma ignição por bobina constitui de uma bobina com enrolamento primário e secundário, um estágio final da ignição para o comando da corrente através do enrolamento do primário e uma vela de ignição, conectada ao circuito de alta tensão de enrolamento secundário.

O estágio final de ignição liga uma corrente de rede de bordo, antes do ponto de ignição desejado, através do enrolamento primário da bobina de ignição. Enquanto o circuito de corrente do primário estiver fechado, se forma um campo magnético no enrolamento primário.

No ponto de ignição, a corrente através do enrolamento é novamente interrompida e a energia do campo magnético se descarrega através do enrolamento do secundário acoplado magneticamente, ou seja, por indução. Com isso se produz uma alta tensão no enrolamento secundário, a qual gera a centelha proveniente da bobina de ignição. A tensão de ignição necessária na vela de ignição sempre deve ser ultrapassada pela máxima tensão de ignição possível do sistema de ignição.

Após o salto da centelha, a energia ainda restante é convertida durante a duração da centelha na vela de ignição.

Assim, as funções básicas de um sistema de ignição indutivo são:

- determinação do ponto de ignição;
- determinação do tempo de fechamento;
- liberação da energia de ignição.

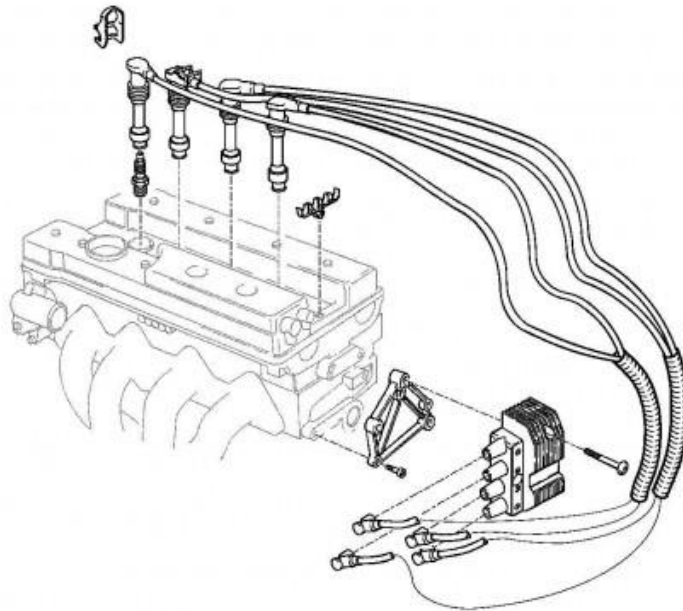


Figura 7. Ignição indutiva [25]

2.3.2 Ignição por Descarga Capacitiva (HKZ)

A ignição por descarga capacitiva, também chamada de ignição tiristorizada trabalha com a energia de ignição armazenada no campo elétrico de um capacitor. A capacitância e a tensão de carga do capacitor determinam a grandeza da energia armazenada. O transformador de ignição transforma a tensão primária gerada pela descarga do capacitor na alta tensão necessária.

A vantagem principal deste tipo de ignição é que ela é insensível a curtos-circuitos elétricos no circuito de ignição, particularmente em velas de ignição sujas. A duração da centelha de 0,1 a 0,3 ms é curta demais para garantir uma inflamação segura da mistura.

2.4 BOBINA DE IGNIÇÃO [23]

A bobina de ignição representa, em princípio, uma fonte de alta tensão carregada de energia com estrutura parecida com a de um transformador. Ela recebe a energia durante o tempo de fechamento ou de carga e, no ponto de ignição (fim do tempo de carga), a energia é liberada para a vela de ignição com alta tensão e energia de centelha necessária.

2.4.1 Constituição

Ela consiste em dois filamentos acoplados magneticamente através de um núcleo de ferro. Este núcleo de ferro contém, eventualmente, um ímã permanente para a otimização de energia. O enrolamento primário tem uma quantidade de espiras significativamente menor do que o enrolamento secundário.

As espiras devem ser muito bem isoladas eletricamente para evitar descargas elétricas e outros fenômenos relativos. Por isso, as espiras são geralmente preenchidas de material isolante na carcaça.

O seu núcleo de ferro consiste em um número de lâminas de material ferromagnético empilhadas, de forma a minimizar as perdas por correntes de Foucault.

O estágio de saída da ignição pode ser integrado alternativamente para a montagem da unidade de comando do motor ou na bobina de ignição. Elementos supressores de interferências podem ser incorporados na bobina de ignição junto com o diodo supressor da centelha de ligamento. É comum se utilizar um resistor supressor de interferência na saída de alta tensão para a vela de ignição.

2.4.2 Funcionamento

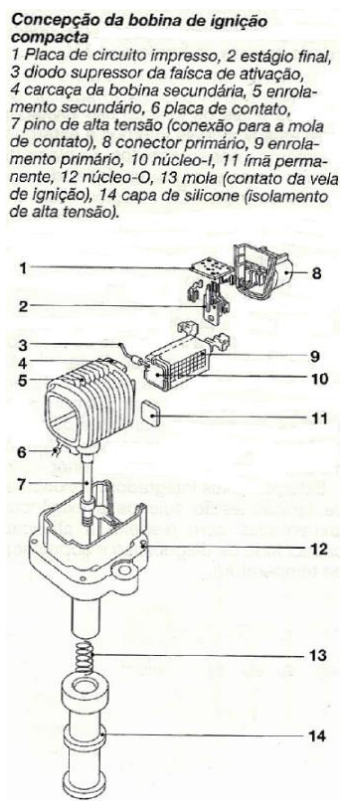


Figura 8. Visão explodida de uma bobina compacta [23]

O estágio de saída da ignição chaveia a corrente primária na bobina de ignição. A corrente aumenta com um retardo de acordo com a indutância. No campo magnético que se cria nesse processo, é armazenada energia na bobina de ignição. O tempo de fechamento é calculado de tal maneira que uma determinada corrente de desconexão e uma determinada energia sejam atingidas no final do tempo de fechamento.

A desconexão da corrente pelo estágio de saída gera uma indução de tensão na bobina de ignição. Do lado primário são algumas centenas de Volts. Por causa da grande relação de transformação entre o enrolamento primário e secundário, ocorrem tensões em torno de 30000 V do lado secundário.

Se a oferta de tensão da bobina de ignição atinge a necessidade de tensão de ignição nos eletrodos da vela de ignição, a tensão cai a uma tensão de faísca de aproximadamente 1000 V. Flui então uma corrente de centelha, a qual diminui com o aumento da duração da

centelha até que a mesma finalmente se extingue. A energia armazenada no processo de carga foi totalmente convertida.

Conforme a corrente muda no tempo em que a corrente primária é cortada, uma tensão de indução na saída da bobina aparece analogamente ao início do tempo de carga. Além disso, essa tensão tem polaridade invertida e é nitidamente menor que a tensão no momento da ignição. Para evitar uma ignição indesejada através da tensão de ativação, ela normalmente é suprimida por meio de um diodo de alta tensão no circuito secundário.

2.4.3 Tipos

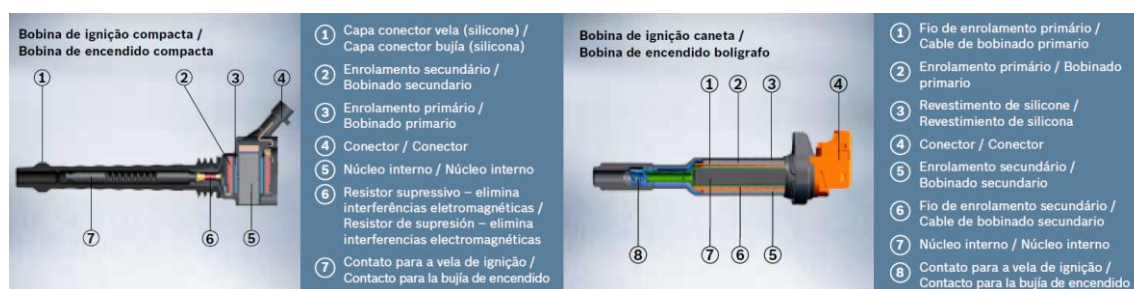


Figura 9. Bobina Compacta e Bobina “Caneta” [25]

Existem vários tipos de bobinas, de modo que é possível as separa-las sob vários pontos de vista.

Ao lado das bobinas individuais, as quais ficam diretamente sobre a vela de ignição, também podem ser agrupadas várias bobinas de ignição como módulo ou “rail”. Tais disposições são então fixadas diretamente sobre as velas de ignição; ou estão um pouco afastadas, sendo que a alta tensão deve ser fornecida pelos cabos apropriados.

Ao lado das bobinas com apenas uma saída de alta tensão também existem aquelas, nas quais as duas extremidades do enrolamento secundário são utilizadas como saída. No caso de descarga do lado secundário, o circuito sempre deve ser fechado através dos dois caminhos da centelha. Como possíveis aplicações existe aqui a ignição dupla ou centelha perdida, ou seja, uma bobina de ignição alimenta duas velas por cilindro. Outra aplicação é a divisão das

duas saídas de alta tensão para duas velas de ignição de cilindros diferentes. No último caso apenas uma vela se encontra no tempo de ignição, com o que a necessidade de tensão e energia da faísca de apoio é nitidamente reduzida. Essa variante oferece, antes de tudo, vantagens de custo, porém deve estar casada com o sistema total, para evitar danos por inflamações indesejadas causadas pela faísca de apoio.

Bobinas de ignição também são distinguidas pela sua concepção básica. Por exemplo, existe a bobina compacta convencional, que possui lados iguais e um circuito magnético de núcleo O/I ou também núcleo C/I. O corpo da bobina fica alojado no motor acima da cavidade da vela de ignição.

Outro tipo é a bobina de bastão ou “bobina caneta”, que se destaca porque penetra com seu corpo na cavidade da vela de ignição. Também, aqui os enrolamentos se encontram em um núcleo I ou em forma de bastão, uma lamela disposta concentricamente em torno dos enrolamentos se encarrega do fechamento do circuito magnético.



Figura 10. Tipos de bobina, respectivamente bobina asfáltica (acima, esquerda), bobina plástica (acima, direita), bobina compacta (abaixo, esquerda) e bobina “caneta” (abaixo, direita)

2.5 A VELA DE IGNIÇÃO [23]



Figura 11. Velas de Ignição [26]

Uma vela de ignição é um dispositivo elétrico que se encaixa a cabeça do cilindro num motor de combustão interna e inflama a mistura comprimida de ar-combustível meio de uma centelha, ou seja, a energia de ignição gerada pela bobina é introduzida na câmara de combustão através da vela de ignição. A alta tensão aplicada cria uma centelha elétrica entre os eletrodos da vela, que inflama a mistura ar-combustível comprimida. Como essa função também deve ser garantida sob condições extremas, a vela de ignição tem um papel importante no desempenho otimizado e funcional do motor de ciclo Otto.

2.5.1 Exigência de Funcionamento

As exigências à vela de ignição são extremas, pois ela está exposta aos processos variáveis periodicamente na câmara de compressão, bem como às condições climáticas externas ao motor.

Quando a vela de ignição é usada com sistemas de ignição eletrônicos podem ocorrer tensões de ignição de até 30000 V, que não podem levar ao centelhamento na cerâmica e na cabeça do corpo da vela. Essa capacidade isolante deve ser mantida por toda a vida útil e garantida com altas temperaturas (até aproximadamente 1000°C).

Mecanicamente, está submetida às pressões que aparecem periodicamente na câmara de combustão (até 100 bar), mas a estanqueidade ao gás não pode diminuir. Além disso, os eletrodos da vela devem ser produzidos com materiais de alta resistência ao calor e às vibrações contínuas. A carcaça deve estar em condições de absorver as forças de aperto sem deformações duradouras.

A parte da vela de ignição que penetra na câmara de combustão está exposta aos processos químicos que ocorrem a altas temperaturas, de modo que se exige resistência contra depósitos agressivos na câmara de combustão. Ao isolador da vela de ignição, se exige uma alta resistência à solitação térmica, pois ele está exposto a uma rápida mudança de temperatura devido à alta temperatura dos gases de escape e à mistura ar-combustível fria. O bom funcionamento da vela de ignição exige uma boa dissipação de calor dos eletrodos e do isolador no cabeçote do motor.

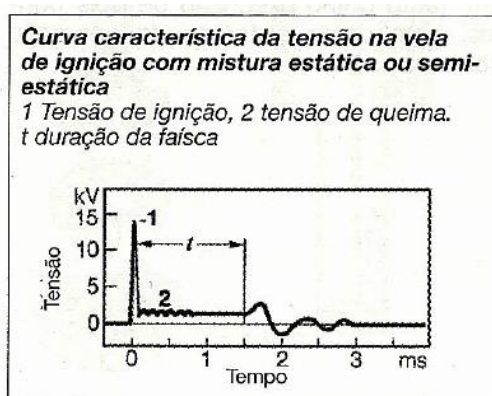


Figura 12. Curva característica da Tensão na vela de ignição. [23]

2.5.2 Concepção

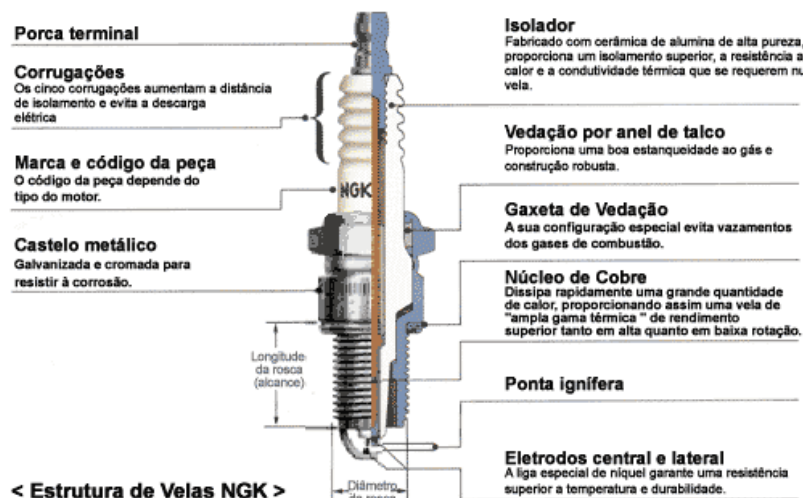


Figura 13. Vela de ignição em corte [26]

O eletrodo central e o pino de conexão estão unidos por vidro fundido condutor de eletricidade dentro de um isolador de cerâmica especial e de alta qualidade. Esse vidro fundido se encarrega, além do suporte mecânico das peças, da estanqueidade contra os gases frente às altas pressões da combustão. Podem também incorporar nele resistores como medida para supressão de interferência e do desgaste dos eletrodos.

Em seu lado de conexão, o isolador tem um vitrificado livre de chumbo, para repelir umidade e sujeira. Isso evita sobremaneira correntes de fuga. Também, a conexão entre o isolador e a carcaça de aço niquelada deve ser estanque ao gás.

O eletrodo massa é fabricado como eletrodo central, normalmente de ligas múltiplas com base em níquel por causa das altas solicitações térmicas. Para a melhor condução de calor, prestam-se tanto para o eletrodo massa, eletrodos compostos com um material de cobertura com uma liga à base de níquel e um núcleo de cobre. Para determinados casos, o material do eletrodo é composto de prata ou platina ou ligas de platina.

De acordo com a conexão de alta tensão, as velas de ignição têm uma rosca M4 ou uma conexão normalizada pela SAE. Para exigências máximas de proteção contra interferências e sistemas à prova d'água, existem velas de ignição com blindagem metálica.

2.5.3 Índice Térmico

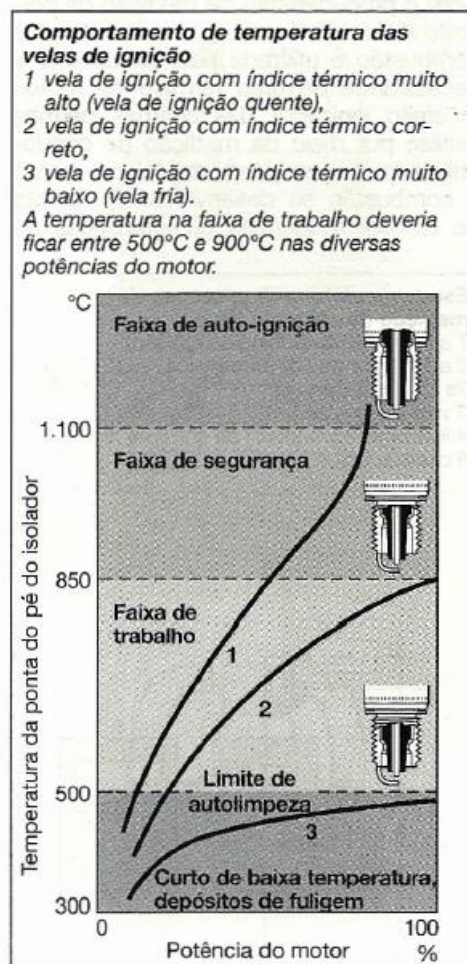


Figura 14. Comportamento de temperatura das velas de ignição [23]

A vela de ignição é aquecida durante pelo calor da combustão. Uma parte do calor absorvido é entregue ao gás fresco. A maior parte é transmitida via eletrodo central e o isolador à carcaça da vela de ignição e desviada ao cabeçote do motor. A temperatura de funcionamento se representa como um equilíbrio entre a absorção de calor do motor e a dissipação de calor para o cabeçote do motor. A intenção é que o pé do isolador atinja a temperatura de autolimpeza de aproximadamente 500°C já com pequena potência do motor.

Se a temperatura ficar abaixo desse nível, existe o risco de que restos de fuligem e óleo de combustões incompletas se depositem nas partes frias da vela de ignição. Isso pode criar uma conexão condutora, ou seja, um curto circuito entre os eletrodos centrais e a carcaça

da vela, através da qual a energia de ignição é desviada como corrente de curto-circuito. Com temperaturas mais altas, os resíduos com teor de carvão se queimam no pé do isolador: a vela de ignição se auto-limpa.

O limite superior deve se manter a aproximadamente 900°C pois nessa faixa, o desgaste dos eletrodos de vela aumenta muito. Se esse limite for bem excedido, aumenta-se o risco de auto-ignição. Estas sobrecarregam muito o motor e podem destruí-lo em pouco tempo. Por isso, a vela de ignição deve ser adaptada em sua característica de absorção de calor conforme o tipo de motor.

Assim, o caracterizador da capacidade de a vela de ignição suportar cargas térmicas é o índice térmico, que é descrito com um número característico determinado em medições comparativas com uma fonte de referência padrão.

Uso de materiais com maior condutibilidade térmica para os eletrodos centrais permite estender o comprimento do pé do isolador sem mudar o índice térmico. Isso estende a faixa de trabalho da vela de ignição para uma sobrecarga térmica menor e reduz a possibilidade de formação de fuligem.

A redução do risco de falhas de queima e ignição, que deixam a emissão de hidrocarbonetos subir abruptamente, gera benefícios para os valores de gases de escape e o consumo de combustíveis nas faixas de baixas cargas transientes.

2.5.4 Relação da Distância Entre Eletrodos e Tensão de Ignição

A distância entre eletrodos é a menor distância entre eletrodos central e de massa e determina entre outros o comprimento da centelha gerada. Por um lado, ele deve ser a maior possível, para que a faísca ative um volume grande e leve a uma inflamação segura da mistura ar-combustível através de uma formação estável do núcleo da chama. Quanto menor for a distância entre eletrodos, menor será a tensão necessária para gerar uma centelha. Com uma distância entre eletrodos muito pequena só se forma um núcleo de chama pequeno na área dos eletrodos. A energia será retirada do núcleo da chama através das áreas de contatos com os eletrodos, e o núcleo da chama só pode se propagar muito lentamente. Em casos extremos, a retirada de energia pode ser tão grande que pode ocorrer até falhas de inflamação.

Com o aumento da distância entre eletrodos, as condições de inflamação são melhoradas, mas a necessidade de tensão de ignição sobe. Para uma dada oferta de tensão de ignição da vela a oferta de tensão é reduzida e o risco de falhas aumenta. O valor da necessidade de tensão de ignição não depende apenas do tamanho da distância entre eletrodos, do formato, da temperatura e do material dos eletrodos, mas também de parâmetros específicos como composição da mistura (valor Lambda), velocidade de fluxo, turbulência e densidade do gás a ser inflamado.

Nos conceitos atuais de motores com elevadas taxas de compressão e grande turbulência de carga, é necessária uma aplicação criteriosa da distância entre eletrodos, para garantir sempre uma inflamação confiável em com um funcionamento de ignição sem falhas.

2.5.5 Posição da Centelha

A posição do caminho da centelha relativa à parede da câmara de combustão define a posição da faísca. Em motores modernos percebe-se uma nítida influência da posição da faísca sobre a combustão. Com uma posição que penetra mais profundamente a câmara de combustão, o comportamento da inflamação pode ser melhorado perceptivelmente. Para a caracterização da combustão servem a suavidade de marcha e a marcha irregular do motor, que é a derivada direta das oscilações de rotação ou pode ser descrita, também, através de uma análise estatística da pressão média induzida.

Por causa das massas maiores dos eletrodos, são atingidas temperaturas maiores, o que por outro lado tem efeito sobre o desgaste dos eletrodos e as suas respectivas durabilidades. Os tempos de vida requeridos podem ser atingidos através de medidas construtivas (prolongamento da carcaça da vela de ignição para fora da parede da câmara de combustão) ou aplicação de eletrodos compostos ou materiais resistentes a altas temperaturas.

2.5.6 Desgaste dos Eletrodos

Por causa do funcionamento da vela em uma atmosfera agressiva, algumas vezes sob altas temperaturas, ocorre um desgaste nos eletrodos, o qual deixa aumentar a necessidade de tensão de ignição. Se essa não puder mais ser coberta pela oferta da bobina de ignição, ocorrerão falhas na ignição.

O funcionamento da vela de ignição também poderá ser influenciado por alterações no motor devido a envelhecimento ou sujeiras. Depósitos na vela de ignição podem levar a derivações e com isso a falhas na ignição, que causam um nítido aumento das emissões poluentes e podem levar a danos no catalisador. Por isso, as velas de ignição devem ser trocadas regularmente.

Por desgaste dos eletrodos, entende-se uma retirada de material nos eletrodos, que deixa crescer a distância entre os eletrodos perceptivelmente com o aumento do tempo de funcionamento. Dois mecanismos são os principais responsáveis por isso: erosão por centelha e corrosão na câmara de combustão.

Para minimização do desgaste dos eletrodos, são utilizados materiais com alta resistência a temperatura, como platina e suas ligas. A retirada do material também pode ser reduzida para o mesmo período de funcionamento através da escolha adequada da geometria dos eletrodos e do conceito de vela de ignição.

O resistor de vidro condutor reduz a queima e contribui para uma redução do desgaste.

2.5.7 Regimes de Funcionamento Anormais da Vela de Ignição

Regimes de funcionamento anormais podem destruir o motor. Sistemas de ignição ajustados incorretamente bem como a utilização de velas de ignição com índice térmico que não combina com o motor ou combustível inadequado podem danificar o motor e as velas de ignição.



Figura 15. Exemplo de vela gasta [26]

Podemos citar dois tipos desses regimes:

- Ignição por incandescência: é um processo de inflamação descontrolado, no qual a temperatura em um lugar na câmara de combustão pode subir tanto que são causados sérios danos à câmara de combustão e seus auxiliares;

- Combustão detonante: detonação é uma combustão descontrolada com um aumento muito acentuado da pressão. Esta combustão é muito mais rápida do que o normal. Por causa dos elevados gradientes de pressão (taxa onde a pressão muda mais rapidamente em torno de uma determinada posição no cilindro), os componentes do motor envolvidos na combustão, como cabeçote, válvulas, pistões e etc., estão sujeitos a uma elevada carga térmica, devido a esses gradientes, que pode levar à danificação de um ou mais componentes.

2.6 O CONTROLE DA IGNIÇÃO [9]

Em motores de ignição por centelha, a mistura ar-combustível é preparada previamente e entra em combustão por uma centelha. A centelha inicia com uma chama laminar pequena que se desenvolve para uma chama turbulenta, se propagando pelo cilindro. A combustão aumenta a temperatura e a pressão, gerando trabalho para o pistão. Assim, o principal objetivo para centelha é iniciar a combustão do combustível e gerar uma combustão estável, isso em uma posição que atinja as demandas de se maximizar a eficiência, preenchendo as demandas de emissões e evitando danos no motor. Entretanto, muitas vezes esse objetivos são conflitantes, como já citado anteriormente. Então, se realiza o controle da ignição com a função de se conciliar alguns desses objetivos e/ou minimizar o efeito de um deles.

Dois parâmetros são essencialmente controlados pela ignição, sendo eles a energia de ignição e o tempo de ignição (timing). O controle da energia de ignição age no controle da energia de ativação para que se realize a combustão. Já o tempo de ignição age no incremento da eficiência do motor.

2.6.1 *Timing* da Ignição e Seu Controle [23]

O avanço da ignição é de grande influência na determinação da eficiência, emissões e durabilidade de um motor. Para isso, podemos definir o ótimo avanço da ignição como, para uma dada condição de operação de um motor, é o tempo de ignição que maximiza o trabalho produzido durante um ciclo.

Então, quando o trabalho produzido é maximizado, se baseando em uma geometria fixa e uma condição de operação constante em rotação constante, constante quantidade de combustível e constante razão ar/combustível, temos que o consumo de combustível será melhor. O tempo de ignição que nos dá o máximo torque efetivo é conhecido como “*maximum brake torque*” (MBT).

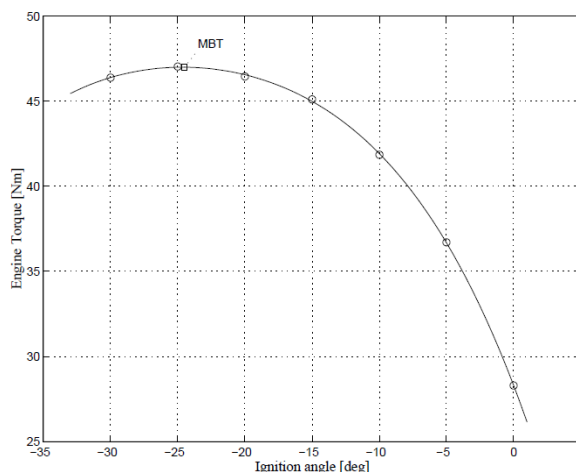


Figura 16. MBT em função do ângulo de ignição [9]

Em sistemas de ignição atuais, o avanço da ignição é controlado usando esquemas de malha-fechada se baseando em informações tabeladas em testes e calibração em bancadas de dinamômetros. Assim, [21] o procedimento de calibração normalmente segue o seguinte procedimento: 1- O torque no MBT é determinado; 2- A ignição é atrasada em direção ao ponto motor superior (PMS) até que o torque seja reduzido a aproximadamente 1% abaixo do máximo e assim, aquele valor é usado. Esse procedimento é usado porque é mais fácil de determinar essa posição, já que o torque em função do avanço da ignição é constante no ponto ótimo. Em adição, com um pequeno atraso a margem para condições de detonação é aumentada e a emissão de NOx é reduzida. A calibração é alocada em uma tabela, que cobre a gama de operação do motor, e fatores de compensação são adicionados quando em situações de partida a frio e de marcha lenta.

O avanço ótimo depende em como a chama se propaga pela câmara de combustão e como as perdas, como a transferência de calor para as paredes e para o pistão, fluem para dentro para fora das fendas. A propagação da chama se torna dependente de em vários parâmetros como rotação, carga, temperatura, admissão, entre outros. Uma calibração básica se baseia em três parâmetros: Rotação, Carga, temperatura de admissão.

2.7 PRESSÃO INTERNA DO CILÍNDRIO [15]

A Pressão interna do cilindro é um parâmetro importante na combustão, pois ela fornece o trabalho produzido na combustão. A observação do comportamento da pressão no interior do cilindro em relação ao tempo mostra substancial variação de ciclo a ciclo. Essas variações podem ser relatadas pelo processo de combustão e o seu desenvolvimento. Em adição a esse efeito, em cada cilindro podem ocorrer diferenças significativas no processo de combustão e no desenvolvimento da pressão nos cilindros de um motor multicilíndrico [15]. Os causadores desse comportamento podem ser: relação ar/combustível em cada cilindro e a interação da mistura fresca e os gases residuais do ciclo anterior.

2.7.1 Relação Entre o Avanço da Ignição e a Pressão Interna do Cilindro

O avanço da ignição é usado para posicionar o desenvolvimento da pressão no cilindro de maneira que a combustão produza o máximo trabalho. Em condições normais de funcionamento, a mistura entra em combustão por volta de 15° a 30° de ângulo do virabrequim antes do pistão ter alcançado o ponto morto superior (PMS). O pico de pressão vem por volta de 20° antes do MBT [9]. Normalmente, o adianto no ponto de ignição origina pressões máximas maiores e máximas temperaturas que aparecem em ângulos do virabrequim anteriores.

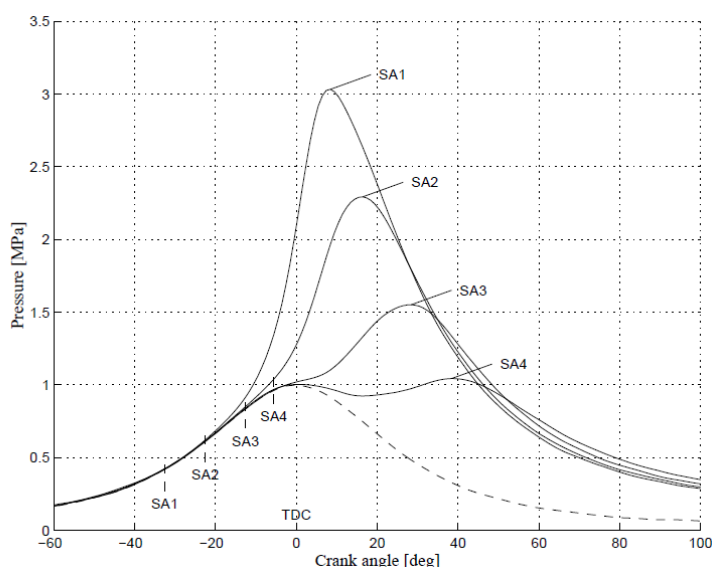


Figura 17. Gráfico de Pressão no cilindro em função do ângulo do virabrequim com diferentes tempos de ignição [9]

Com uma ignição muito adiantada o aumento da pressão começa muito cedo e gera resistência contra o movimento do pistão. Também existem as perdas de calor citadas anteriormente, as quais, com um avanço no ponto de ignição, acontecem previamente, reduzindo o trabalho produzido pelo gás. Altas pressões geram altas temperaturas que decresce a diferença entre a energia interna dos reagentes e dos produtos da combustão, ocasionando em baixas taxas de conversão de energia. Isso ocorre pela relação que a pressão tem com a temperatura. Uma ignição muito atrasada trás um incremento na pressão que chega tardiamente, de modo que a trabalho é perdido durante a fase de expansão.

2.7.2 Pico de Pressão [27]

Para se definir a posição da pressão interna do cilindro relativa ao PMS, a Posição de Pico de Pressão (PPP) é utilizada como parâmetro o qual relaciona a posição de ângulo do virabrequim onde a pressão interna é de máximo valor. O PPP ocorre depois do PMS.

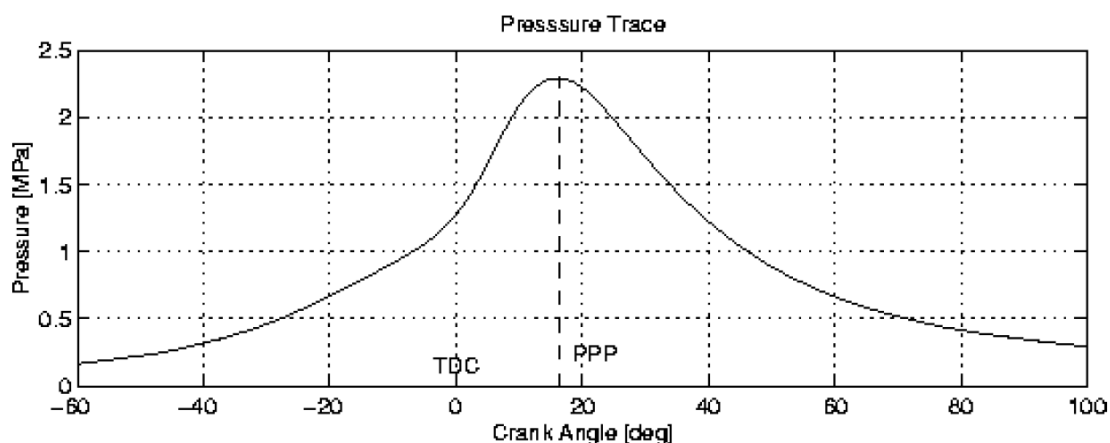


Figura 18. Gráfico de pressão demonstrando o PPP [27]

2.8 LIMITES DE DESEMPENHO POR COMBUSTÃO ANORMAL

Existem três tipos de combustão anormal nos motores a centelha, sendo eles a pré-ignição, a autoignição e a detonação.

2.8.1 Pré-Ignição [23]

Este tipo de ignição acontece quando a ignição é iniciada por um ponto quente, geralmente um depósito de carbono ou pelos eletrodos da vela (quando de grau térmico mais elevado que o indicado). Ela pode se originar antes da centelha da vela ou depois de sua ocorrência.

Como a pré-ignição aumenta o nível térmico do ciclo, o ponto quente originário do início da combustão aquecerá mais, originando iniciando a combustão mais cedo. Desta maneira é fácil que ponto de máxima pressão do ciclo ocorra antes do PMS, anulando o torque do motor.

2.8.2 Autoignição [24]

Este tipo de combustão caracteriza-se por uma ignição instantânea de toda a mistura geralmente motivada por alta taxa de compressão e/ou paredes muito quentes.

Alguns motores a centelha, como os de aeromodelismo, funcionam com este princípio, usando uma vela de incandescência e elevados valores de taxa de compressão.

2.8.3 Detonação [24]

Este tipo de combustão é uma forma de autoignição de uma parte da mistura, na qual as condições de temperatura são superiores às de ignição espontânea do combustível, e caracteriza-se por velocidades de propagação de chama excessivamente elevadas e por um ruído metálico (“bater pino”).

Este fenômeno acontece após o início da combustão normal iniciada pela faísca. Na combustão normal, a velocidade de combustão é relativamente baixa, pelo que as ondas de pressão produzidas, viajando a velocidade do som, fazem aumentar a pressão em toda a

câmara. Com este aumento súbito de pressão, a temperatura da mistura também aumenta e pode-se chegar às condições de ignição num determinado ponto da câmara de combustão em que a mistura já tenha sido aquecida por convecção pelas paredes aquecidas e por radiação.

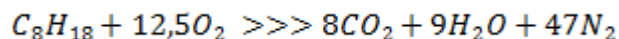
Enquanto que a deflagração da mistura se processa a uma velocidade subsônica, a detonação se propaga a velocidades sônicas relacionadas aos gases de combustão. A combustão normal gera ondas de pressão que viajam a velocidade do som, pelo que a sua velocidade é superior à da velocidade de frente de chama. Para tal, a velocidade de chama e de propagação da pressão são iguais, o que ocasiona o aumento brutal da pressão local e origina ondas de pressão elevadíssimas. Estas ondas de choque são as responsáveis pelo barulho e vibrações característicos.

Como se propagam a elevada velocidade, ondas são formadas e se refletem nas paredes do cilindro, o que resulta numa pressão oscilante, criando uma vibração. Embora esta vibração e o barulho característico sejam a indicação do aparecimento da detonação, estas não são as características perigosas deste tipo de combustão. Com o grande aumento de pressão, a temperatura aumenta excessivamente, pondo em risco os materiais, principalmente os pistões. Estes, como costumam ser de alumínio, não aguentam altas temperaturas continuamente, podendo fundir a sua cabeça e abrir um buraco no seu meio. As válvulas de escape poderão também sofrer com a detonação, pois a temperatura dos gases de escape irá se elevar.

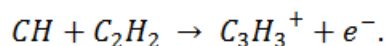
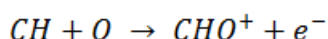
A detonação ocorre perto do final da combustão, nas imediações do PMS, mas, geralmente, após este ponto. Este tipo de combustão pode ser evitado ou minimizado pela redução da taxa de compressão, pela melhoria do combustível (maior octanagem), pelo arrefecimento da mistura e pelo atraso da ignição. Esta última ação é pouco eficaz em motores de elevada taxa de compressão.

2.9 CORRENTE IÔNICA

Em uma combustão ideal, moléculas de hidrocarboneto reagem com o oxigênio e geram monóxido de carbono e água. Uma reação ideal do hidrocarboneto isooctano é dada por [9]



Na combustão, outras reações também ocorrem, sendo que em várias dessas liberam íons presentes na combustão. Alguns deles são



Esses íons e outros mais são gerados por reações químicas na chama, ou seja, são criados no aumento da temperatura e pressão.

Para detectar esses íons, é aplicada uma corrente contínua na vela de ignição, gerando um campo elétrico. O campo elétrico faz com que os íons se movam e gerem uma corrente iônica.

2.9.1 Importância da Medição da Corrente Iônica [12]

Alguns problemas restringem o desenvolvimento de motores de combustão interna. Para aumentar a eficiência e diminuir o consumo, o motor deve operar próximo do ponto ou *timing* de PMS. Entretanto, a capacidade de operação é restringida pela detonação e pela detecção homogênea da detonação em todos os cilindros e em todas as condições de operação. Outro problema é que, para se alcançar padrões estritos de emissões, a detecção de autoignição é requerida para todas as rotações do motor através da interface OBD-II.

O método atual de detecção dos fenômenos citados anteriormente contém algumas deficiências. Os acelerômetros do sensor de detonação perdem precisão em altas rotações do motor por causa de ruído gerado pela vibração e falha na detecção da detonação inicial. O método de detecção de autoignição, chamado de método da variação da rotação, também fica limitado quando se começa a aumentar o número de cilindros do motor (V6, V8) e em altas rotações. Outros sensores que cumprem essa tarefa, como um sensor de pressão, não são adequados pelo seu alto custo e limitações técnicas.

Todos esses problemas podem ser resolvidos através do sensoriamento da corrente iônica dentro do cilindro do motor de combustão interna.

2.9.1.1 *Background* do Sensoriamento Iônico [12]

O estudo do sensoriamento iônico para automóveis por pesquisadores começou depois de 1980 em estudos para se determinar a razão ar-combustível e a estimativa da pressão interna do cilindro. Primeiramente o sensoriamento se originou dentro do cilindro ou perto do final do duto de escape.

Em 1987 a empresa SAAB usou o sensoriamento no seu sistema de ignição. Originalmente, o sensoriamento foi usado na sincronização dos cilindros e para a detecção de pré-ignição. A detonação e autoignição foram detectadas em 1992, usando o mesmo sistema. Hoje em dia, algumas empresas de automóveis utilizam esse sistema em seus veículos de estado-da-arte, mas o conhecimento sobre o sistema ainda é muito industrial.

2.9.2 Sensoriamento Iônico [10]

Com o procedimento de medição de corrente iônica, a característica de combustão é utilizada para determinar a necessidade de grau térmico do motor. O efeito “ionizador” das chamas permite avaliar, por meio da medição da condutibilidade no caminho da centelha, como a combustão se desenvolve em função do tempo. Mudanças características no processo de combustão através de uma sobrecarga térmica maior das velas de ignição podem ser detectadas usando a corrente iônica. Essas informações podem ser usadas para avaliação do processo de autoignição. A adaptação da vela de ignição tem que ocorrer de tal maneira que sejam evitadas inflamações térmicas antes do ponto de ignição (especialmente pré-ignição).

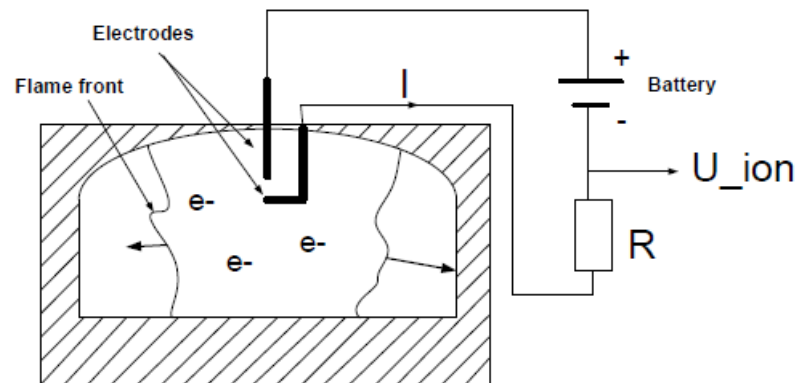


Figura 19. Esquemático de sensoriamento de corrente iônica [10]

A corrente, geralmente, é medida no secundário da bobina, não sofrendo pulsos de alta tensão por causa da presença de elementos eletrônicos de proteção (diodos).

Alguns parâmetros da combustão e do motor podem ser adquiridos por esse sensoriamento. Dentre eles podemos citar [10]:

- . Intensidade da detonação em cada cilindro individual, expresso por uma frequência maior adicionada ao sinal da frequência;
- . Fase do motor (determinação em qual fase do ciclo o cilindro se encontra);
- . Detecção de pré-ignição;
- . Falha na ignição (centelha perdida).

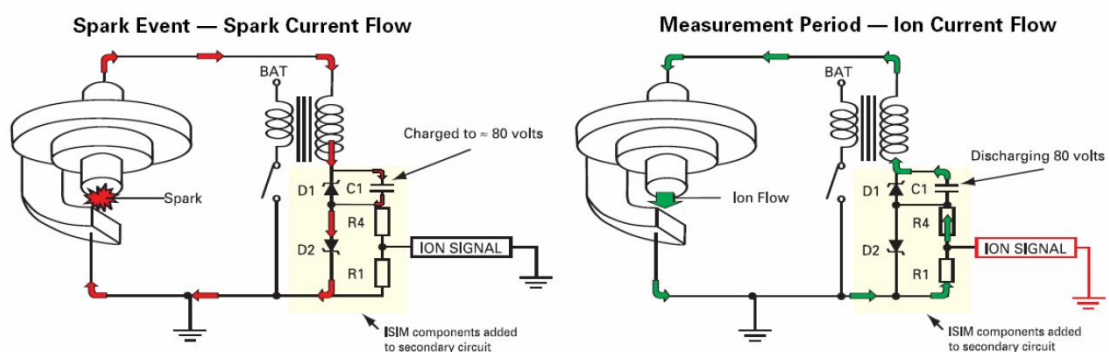


Figura 20. Esquema comercial já existente de medição de corrente iônica [17]

Entretanto, essa tecnologia ainda contém algumas dificuldades práticas, como a falta de informação tecnológica disponível (grande parte é segredo industrial) e o apoio logístico de peças para motores no mercado para se analisar esse tipo de sinal. Outra dificuldade é a variação do grau de ionização de combustíveis diferente, fazendo com que se deva adaptar o circuito para cada tipo de combustível.

2.9.3 Sinal da Corrente Iônica

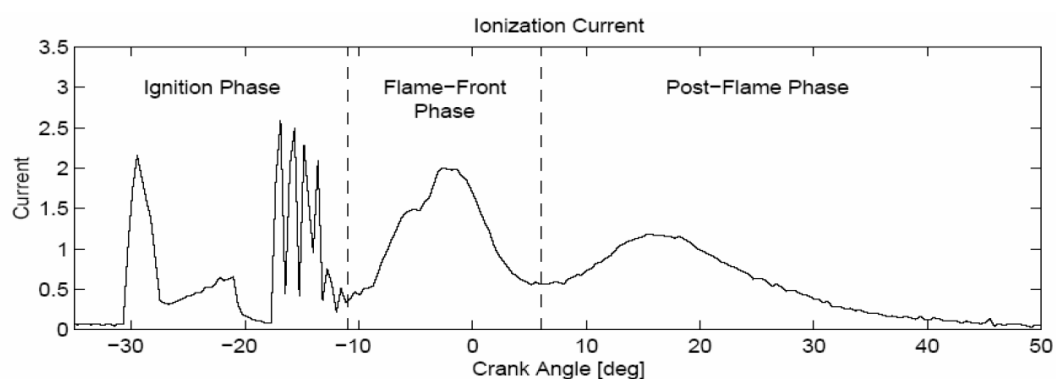


Figura 21. Sinal característico da corrente iônica de um ciclo de ignição [27]

A corrente iônica tem três fases características [9]: ignição, frente de chama e pós-chama. Na fase de ignição a corrente de ionização é larga, com polaridade invertida. Nessa fase, ocorre um ruído na bobina depois da ignição. A alta densidade de íons, associada com as reações químicas na chama produzem um ou mais picos na fase de frente de chama. Os íons gerados pela chama têm diferentes taxas de recombinação. Alguns se recombinaem muito rápido com moléculas mais estáveis, enquanto outros tem um tempo residual maior. Isso resulta em um alto pico, que se estabiliza e decai conforme os íons mais estáveis permanecem.

Na fase de pós-chama, os íons mais estáveis permanecem, gerando um sinal que acompanha a pressão do cilindro devido ao efeito que eles têm na concentração molecular. Íons são também criados pela voltagem medida e pela elevada temperatura dos gases de escape, já que a temperatura acompanha a pressão durante a compressão dos gases de escape, na conclusão da combustão. Então, a corrente de ionização vai depender diretamente da pressão.

3 OBJETIVOS

A ideia principal desse trabalho é utilizar a vela de ignição de um motor de combustão interna como um sensor da resistividade do plasma na câmara de combustão. Para se alcançar este objetivo, utiliza-se a corrente iônica proveniente de uma pequena diferença de potencial o qual é submetido os eletrodos da vela. A intensidade dessa corrente depende fortemente das propriedades do plasma e da combustão no interior do cilindro.

Como objetivo, almeja-se, a partir de um dos quatro cilindros de um motor do ciclo Otto (a centelha), realizar a aquisição do sinal da corrente iônica, utilizando circuitos eletrônicos de aquisição do sinal e testando um circuito de fabricação própria.

Após a captura do sinal por uma bancada de testes montada com os equipamentos de aquisição e análise pretendidos, deve-se analisar o sinal tentando se aproximar dos resultados teóricos apresentados por diversos autores referenciados no texto (principalmente [9]). Ou seja, tem-se como ideia relacionar o sinal da corrente iônica adquirida, dada às limitações experimentais, com o comportamento interno da combustão no cilindro. Assim alguns parâmetros de comparação podem ser explorados, como pressão interna, velocidade e tempo de chama, dentre outros.

Desta maneira, pretende-se entender melhor alguns fenômenos e dados do funcionamento do motor de combustão interna, como o fenômeno da detonação, definição da fase de ignição, captação da razão volumétrica, estequiometria da mistura e outros, possibilitando uma aplicação futura da corrente iônica, com maior precisão e, principalmente, controle eletrônico de parâmetros, possibilitando a redução de aparatos sensoriais instalados e aumentando a precisão de controle.

4 METODOLOGIA

Para a captura do sinal desejado da corrente iônica, todo um aparato deve ser montado sendo constituído de uma bancada de testes composta por um motor a centelha acoplado em um dinamômetro de bancada, um circuito eletrônico de aquisição de dados, um osciloscópio para a aquisição da curva e um computador de interface para os dados do osciloscópio.

O sinal adquirido deve ser analisado por meio de software de interface e tratamento de dados de modo que se possa interpretar parâmetros do motor de combustão interna por meio da corrente iônica. Portanto, além da análise do sinal, deve-se analisar outros tipos de parâmetros como velocidade do motor (RPM), carga (torque) e abertura da vela de ignição (GAP), dados esses ou medidos ou previamente aplicados como dados de entrada no motor.

Depois de realizada a aquisição e análise dos dados, as interpretações possíveis serão explanadas de forma a justificar a utilização da corrente iônica como meio para verificação e avaliação de parâmetros de funcionamento de motores de combustão interna.

Deste modo, será apresentado detalhadamente os aparelhos e ferramentas utilizados e desenvolvidos para a aquisição do sinal e a metodologia de testes seguida.

4.1 MOTOR UTILIZADO

O motor utilizado foi um motor 4 tempos de 1612 cilindradas a centelha (ciclo otto) da marca Chevrolet de 1995 usado no Chevrolet Corsa. Para se realizar os testes, algumas modificações foram realizadas. Dentre elas, a principal, que será abordada no próximo tópico, foi a conversão do sistema de bobina de uma bobina eletrônica simples para um sistema de 4 bobinas compactas individuais, para se realizar a análise monocilíndrica.

Todo um processo de limpeza interna e reparo foram realizados de maneira a deixar o motor com pleno funcionamento mecânico, o que inclui descarbonização, troca das juntas, troca da vela de ignição, limpeza das válvulas, troca de óleo. Assim, também foram medidas as especificações do mesmo incluindo dados de projeto e de eficiência do motor.

A curva de eficiência mecânica do motor e os resultados das experiências foram realizados em laboratório com o auxílio de um dinamômetro hidráulico de bancada que utiliza uma célula de carga para medir o torque gerado do motor.

Abaixo estão uma tabela de dados gerais do motor e uma curva característica de torque do motor utilizado. A tabela de dados demonstra as características de projeto do motor. Já a curva apresentada abaixo pode auxiliar em uma comparação entre a curva de eficiência do motor quando sem alterações e a curva de eficiência com o mesmo alterado, seja mecanicamente ou, como é o caso deste projeto, eletronicamente.

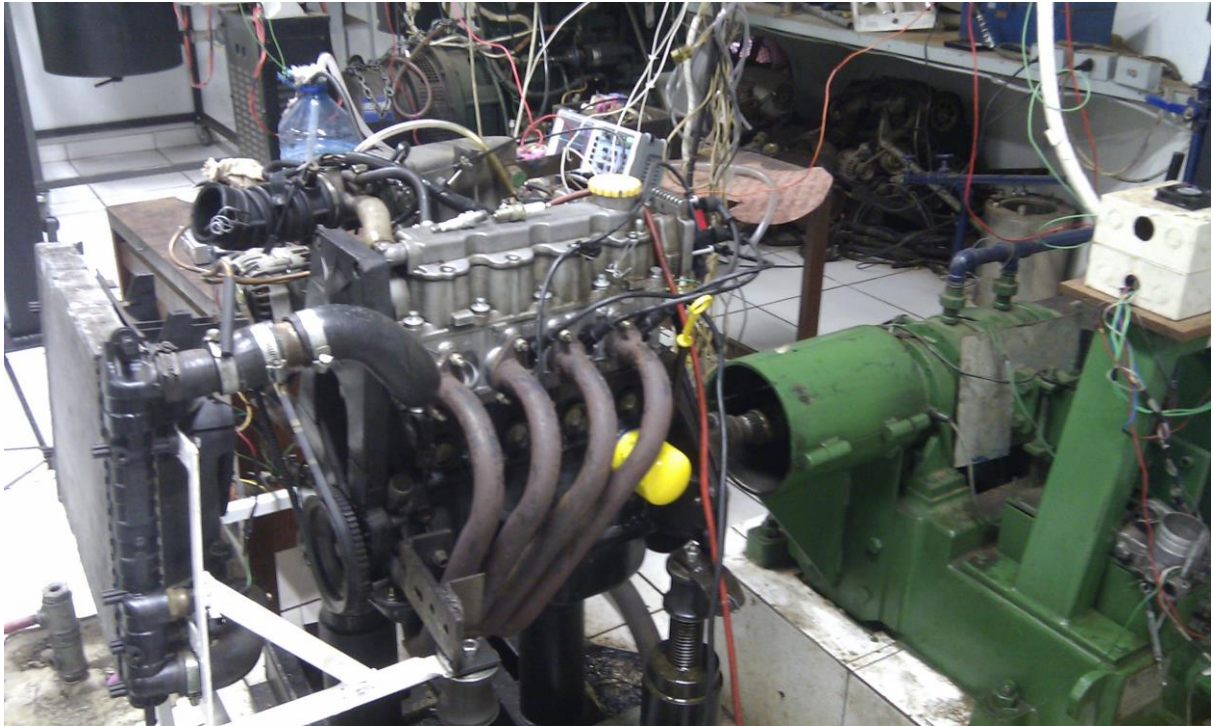


Figura 22. Imagem do motor utilizado montado em bancada de dinamômetro

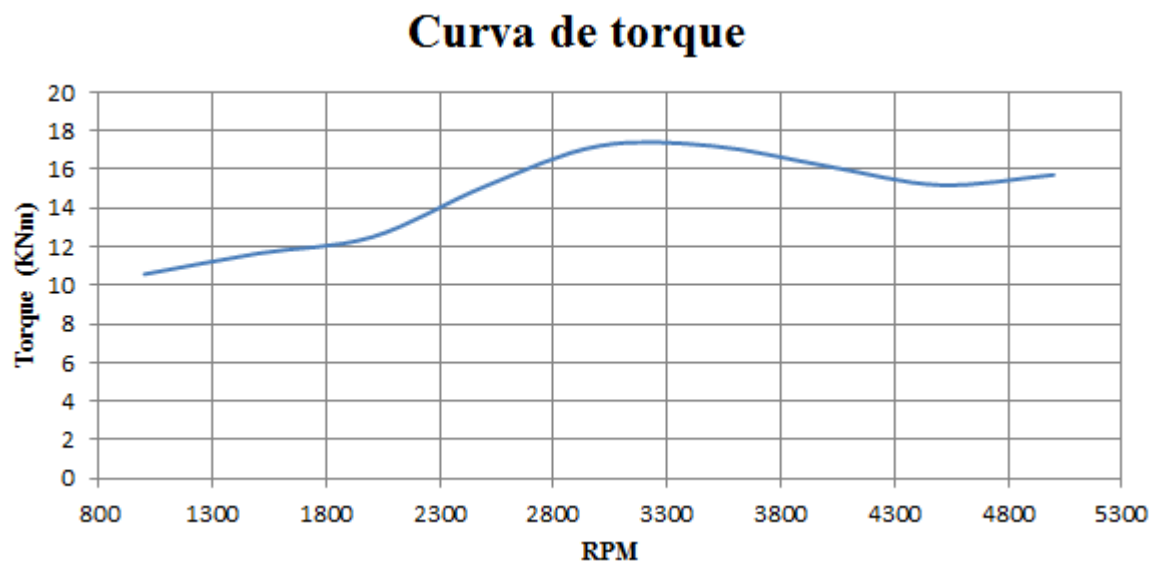


Figura 23. Curva característica de torque do motor utilizado

Tabela 1. Informações fornecidas e medidas do motor utilizado

Motor Chevrolet 1995 MPFI (Corsa)	
Combustível	Etanol
Cilindrada (cm ³)	1612
Taxa de compressão	12,55:1
Diâmetro x Curso (mm)	79,4 x 81,38
Disposição do Cilindro	Horizontal
Sistema de Ignição	Elétrica
Sistema de Lubrificação	Banho de óleo por pressão
Sistema de Injeção	Injeção Eletrônica Multiponto
Sistema de Refrigeração	Direto - Fluido
Nº de Válvulas	8
Potência (cv)	92 (5200 RPM)

4.2 CONVERSÃO DE BOBINA ELETRÔNICA CONVENCIONAL PARA BOBINA COMPACTA POR CILÍNDRIO

Dado que o motor utilizado foi um motor 4 cilindros, para se analisar a corrente iônica em somente um cilindro, houve a necessidade de se mudar a originalidade do mesmo, que é de centelha perdida (sistema que envia duas centelhas simultaneamente, sendo uma na combustão e outra na exaustão na ordem de ignição dos cilindro que, para o dado motor é na ordem 1-4, 2-3) para um motor com de centelha individual nos 4 cilindros.

4.2.1 Circuito de comando de ignição

Dada à necessidade de se converter o sistema de ignição do motor usado, montou-se um sistema em paralelo com o motor o qual constitui em um chaveador eletrônico sincronizado com a fase do primeiro cilindro por um sensor de posição na polia do comando de válvulas.

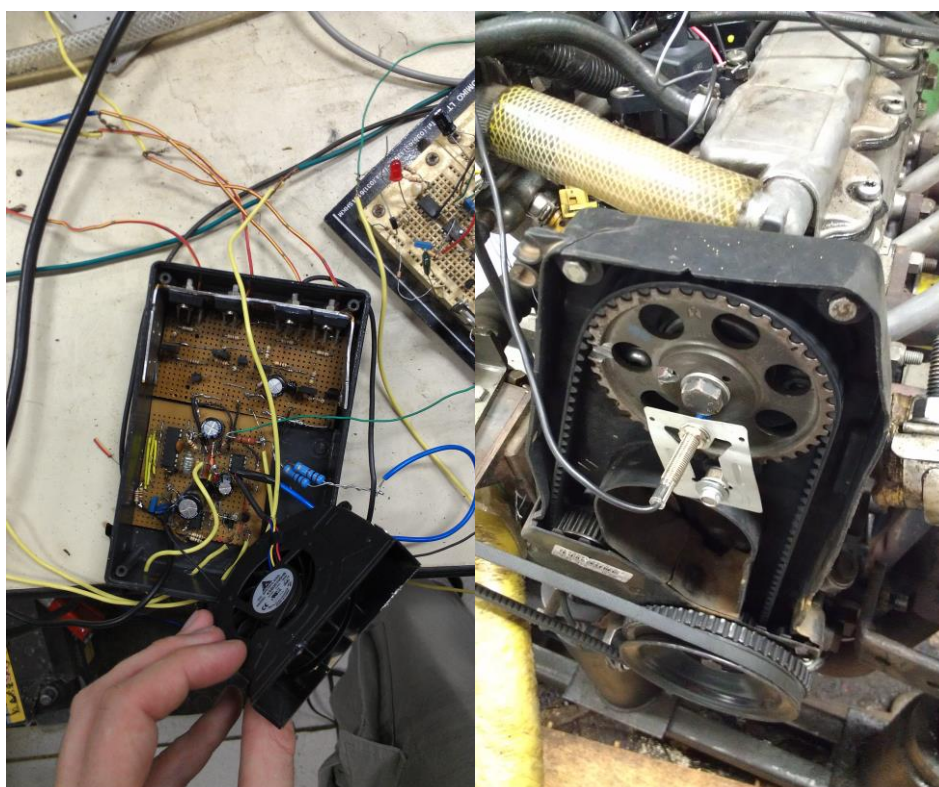


Figura 24. Circuito montado e sensor de posição utilizado

Seu funcionamento segue a lógica de um rotor de um distribuidor, só que de maneira eletrônica. O sensor manda uma ordem para o circuito eletrônico indicando qual é o primeiro cilindro e qual é a sua posição a qual tem que ser o PMS. Sendo sincronizada a chave eletrônica, dois sinais servem de entrada, o de fase do motor e o sinal de chaveamento da bobina convencional original (1-4 e 3-2). Faz-se então um *by-pass* para a central de ignição. Então, o sinal de chaveamento da bobina passa para o circuito junto com o sinal do PMS do primeiro cilindro, sendo que os dois chegam sincronizados. Assim, automaticamente, onde iam sair duas centelhas em dois cilindros do motor, sai somente uma por cilindro.

Após o sinal da centelha do primeiro cilindro ser enviado, o próximo sinal é o do terceiro cilindro. O próximo sai para o 4 cilindro e depois para o 2 cilindro. Assim, pode-se dizer que o sistema de ignição foi convertido de centelha perdida para sequencial fasada.

O circuito desta central de ignição foi projetado e montado pelo técnico Eurípedes Rodrigues de Oliveira locado no Bloco G da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Sua adaptação, acerto e instalação foi realizada sob supervisão e auxílio do mesmo.

4.2.2 Escolha da bobina de ignição e testes do sistema

A necessidade da escolha da bobina para o sistema de ignição é de fundamental importância para o funcionamento do sistema de conversão. As bobinas têm como requisitos serem adequadas para a conversão e para os testes com o circuito de corrente iônica. Foram escolhidas para se adequar ao sistema dois tipos de bobinas: a bobina Renault nº 7700875000 de 2 pinos e a bobina Bosch nº 0 221 504 014 de três pinos. Essa escolha foi dada tanto por disponibilidade das mesmas quanto por custo.

Para o caso da bobina Renault, se utilizaria 3 bobinas da mesma e uma bobina Bosch para se realizar a aquisição do sinal, após aprovado o pleno funcionamento do sistema com todas as bobinas iguais.

Para o caso do sistema com todas as bobinas sendo Bosch, realizaria os testes com 4 bobinas, uma por cilindro, podendo se adaptar o circuito de corrente iônica em qualquer cilindro sem se adaptar outra bobina.



Figura 25. Bobinas Bosch nº 0 221 504 014 e Renault nº 7700875000, respectivamente

Foram realizados testes de tensão e de uso no motor. Os testes foram realizados com o auxílio de um osciloscópio e um multímetro para se obter as tensões de chaveamento e de pico da bobina.

Para os testes de tensão foi encontrado que, conforme a tabela a baixo, a voltagem da bobina da Bosch tem voltagem de aproximadamente 61% maior que a bobina Renault, sendo ela também mais potente quando submetidas a uma mesma corrente. Isso quer dizer que a centelha que sai pela bobina Bosch é mais forte que a centelha da bobina Renault.

Tabela 2. Resultado dos testes de tensão das bobinas

Bobinas	Renault nº 7700875000	Bosch nº 0 221 504 014
Tensão	280V	720V

Os testes de uso no motor foram realizados através da aquisição da curva em plena carga, com a abertura dos eletrodos das velas e ponto do motor iguais, originando a curva de torque a baixo.

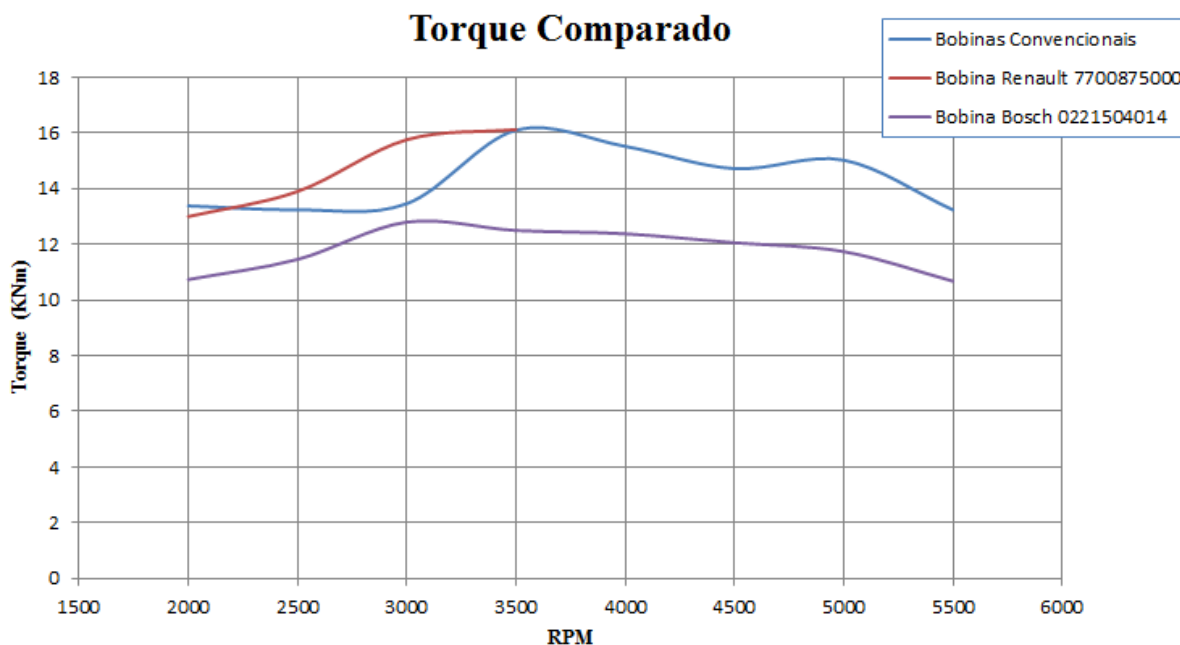


Figura 26. Curva de torque do motor utilizando 3 tipos de bobinas

Foi observado que, com a bobina Renault, o motor não passou de 3500 RPM. Isso foi atribuído à falta de capacidade de suprir a demanda de potência da centelha para o motor pela bobina, o que se chama de “centelha fraca”.

A bobina Bosch cumpriu a função, pois conseguiu suprir a demanda de potência da centelha para o motor. O sistema com essas bobinas não atingiu a mesma eficiência do sistema convencional, entretanto deixou o motor mais estável. A sua curva característica justifica essa afirmativa e mostra que o torque oscila pouco quando se varia a rotação, fazendo com que a curva com as bobinas Bosch fique mais plana do que a semelhante com a bobina convencional original. Isso também é demonstrado pelo desvio padrão dos valores adquiridos na bancada do dinamômetro. O desvio padrão médio do sistema convencional, demonstrado na tabela a baixo, é aproximadamente duas vezes superior ao do sistema com as bobinas Bosch. Isso demonstra que ocorreu uma maior oscilação do motor com a bobina convencional do que com as bobinas Bosch nos pontos adquiridos.

Tabela 3. Desvio padrão médio para cada sistema

Desvio padrão médio Convencional	Desvio padrão médio Bosch
0,1821604	0,089356477

Portanto, a bobina Bosch nº 0 221 504 014 foi escolhida por ter se adequado melhor ao sistema projetado.

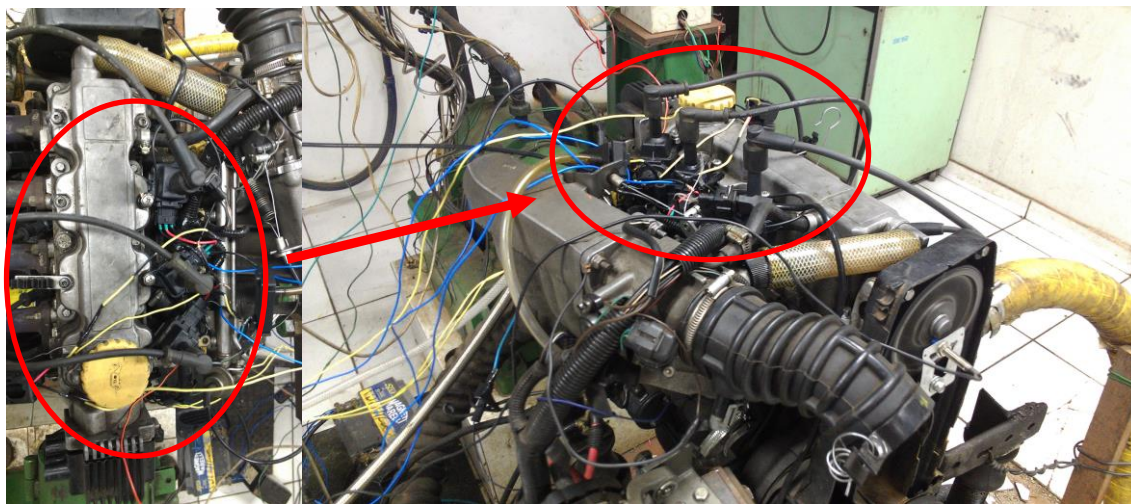


Figura 27. Bobinas instaladas no motor

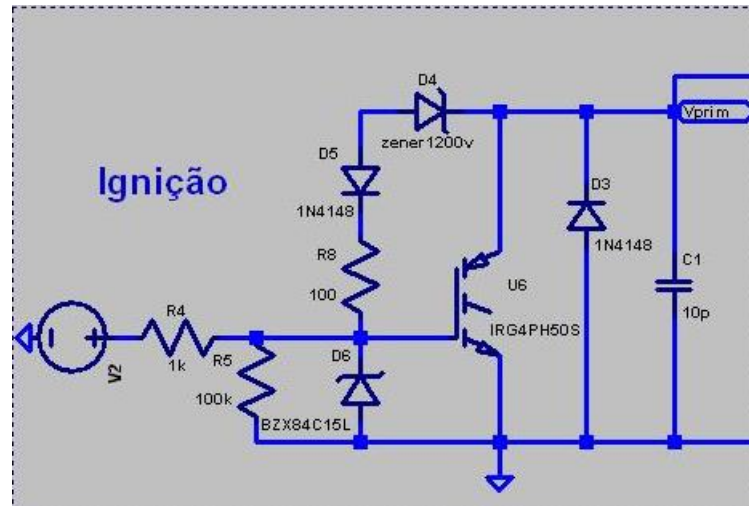


Figura 29. Circuito da Ignição

No circuito da ignição, a fonte V2 envia o sinal de ignição para o transistor bipolar IGBT IRG4PH50S, funcionando como um “switch” e disparando o primário da bobina. Assim, o comando de ignição pode ser enviado para a bobina, o que dará início a ignição na vela de ignição.

- Bobina de Ignição:

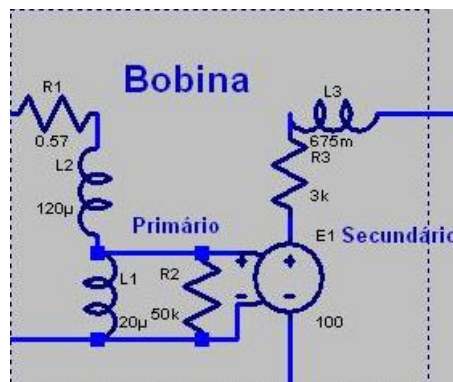


Figura 30. Circuito da Bobina de Ignição

O circuito da bobina de ignição usa uma fonte de tensão controlada por tensão (E1). A corrente de ignição é chaveada e percorre o primário da bobina. Assim, conforme for a indutância, a corrente aumenta, passando pelo secundário da bobina.

- Vela de Ignição:

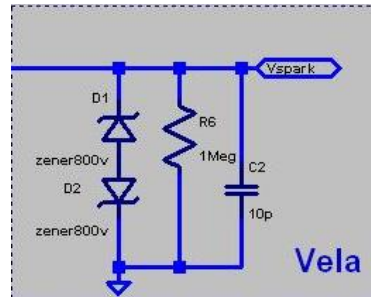


Figura 31. Circuito da Vela de Ignição

O circuito da vela de ignição, através de dois diodos zener de 800 V libera a centelha para a câmara de combustão através da corrente que chega do secundário da bobina.

- Circuito do Sensor Iônico:

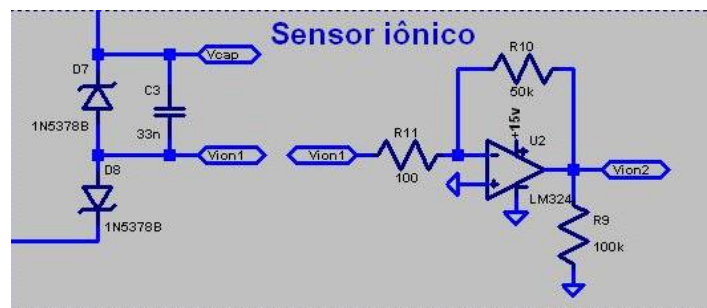


Figura 32. Circuito do Sensor Iônico

Durante a centelha, a tensão na vela fica em -800 V, e o capacitor é carregado. Após a centelha, a polaridade sobre a vela é revertida e passa a 80 V. Conforme o capacitor descarrega, a tensão sobre a vela diminui. Assim, a corrente iônica é convertida em tensão pelo amplificador operacional LM324 e, logo após, pode ser medida na saída do mesmo.

É importante notar que o circuito é ligado entre o terra do secundário da bobina e o terra. Os diodos D7 e D8 são do tipo Zener de 80 V, e o capacitor C3 é de 33nF e 300V.

4.2.2 Simulação

O circuito idealizado foi montado e simulado no software LT Spice 4.17v. O objetivo é se alcançar um comportamento próximo ao que a literatura descreve [11], assim possibilitando a montagem do circuito físico para os testes.

Sendo assim, obteve-se o sinal esperado para a aquisição da corrente iônica, sendo este adquirido pelo circuito sensor de corrente iônica.

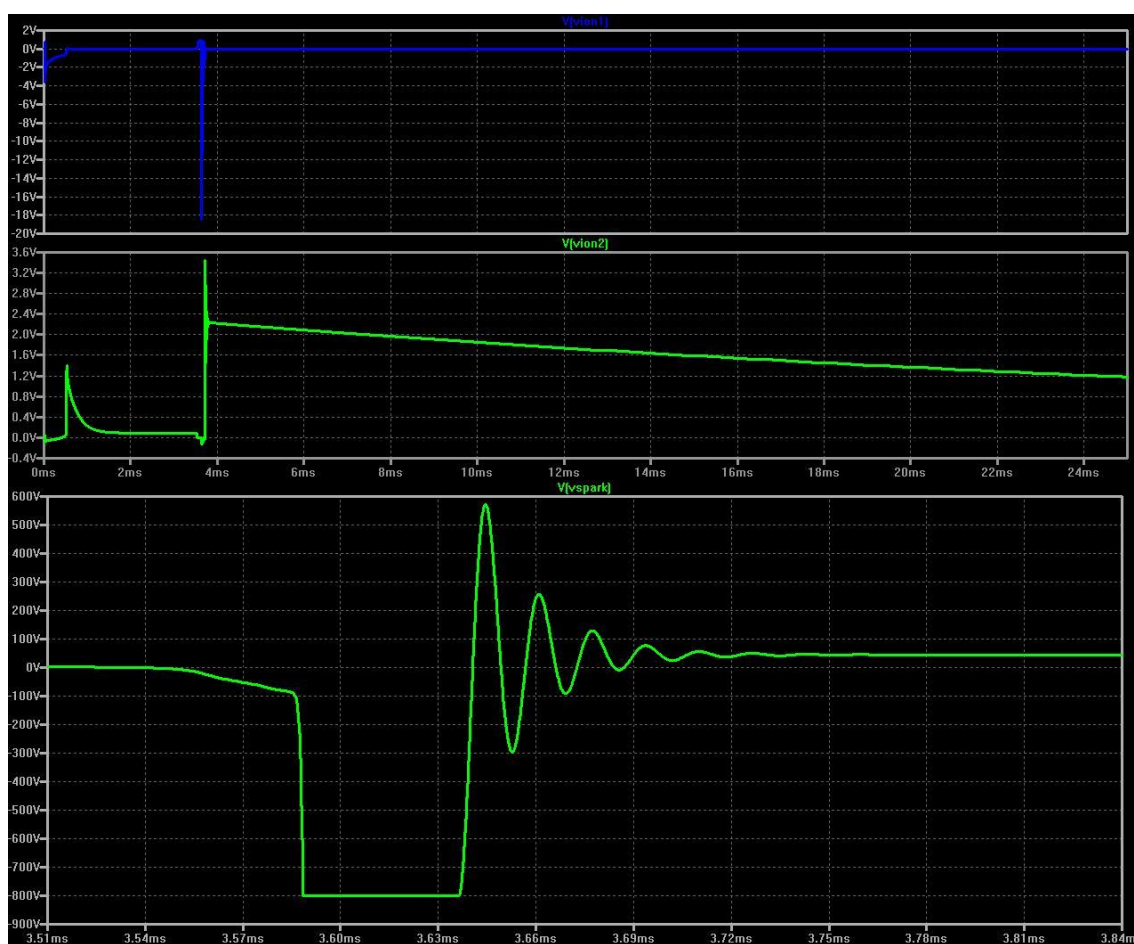


Figura 33. Sinais adquiridos através de simulação do circuito iônico e do comportamento da vela de ignição, respectivamente.

O sinal observado pela simulação demonstra uma ideia do sinal a ser adquirido. Essa simulação permite realizar uma montagem do circuito sabendo que ele tem uma confiabilidade para a aquisição do sinal.

4.2.3 Montagem

O circuito foi montado com os componentes usados na simulação em uma protoboard antes de se ter o circuito final. Assim, os componentes utilizados foram:

- 2x zener de 80V
- 1x capacitor de poliéster 33n/630V
- 1x resistor de 100 ohms
- 1x resistor de 50k ohms
- 1x resistor de 100k ohms
- 1x resistor de 10k ohms
- 1x potenciômetro de 40k
- 1x Amplificador Operacional LM324

Este circuito permite realizar as medições necessárias, ligando a entrada no terra da bobina e a saída no osciloscópio para observar a curva do sinal da corrente iônica.

O circuito foi testado em uma placa protoboard e montada para uma placa de circuito trilhada.

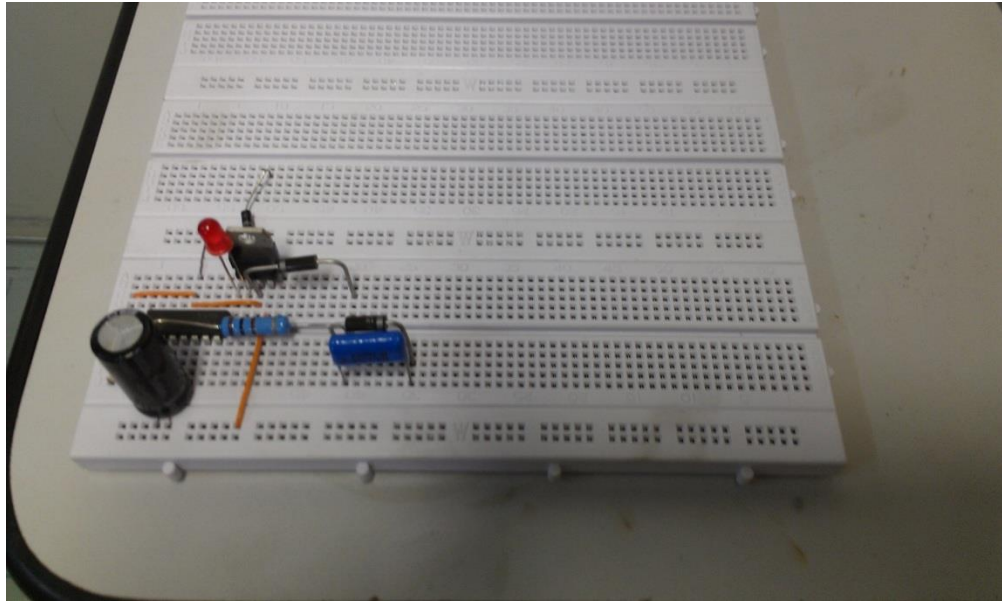


Figura 34. Circuito de sensoriamento de corrente iônica (proto-board)

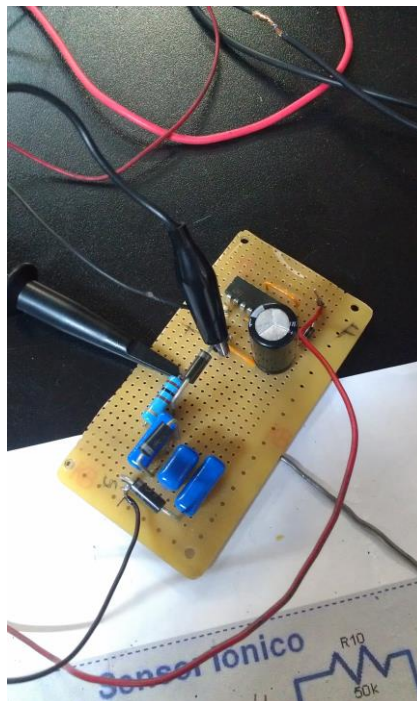


Figura 35. Circuito de sensoriamento de corrente iônica (final)

4.3 BANCADA DE TESTES

A bancada de testes será constituída do motor para testes conectado no dinamômetro de bancada e bancada de aquisição de dados. Esta última é constituída pelo circuito de sensoriamento iônico, um osciloscópio, e um computador para aquisição de dados através do osciloscópio.

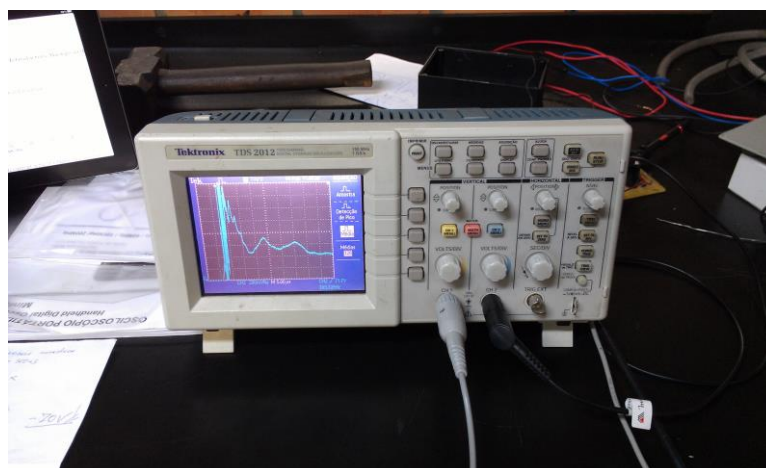


Figura 36. Osciloscópio Digital modelo Tectronix TDS 2012 de 100MHz

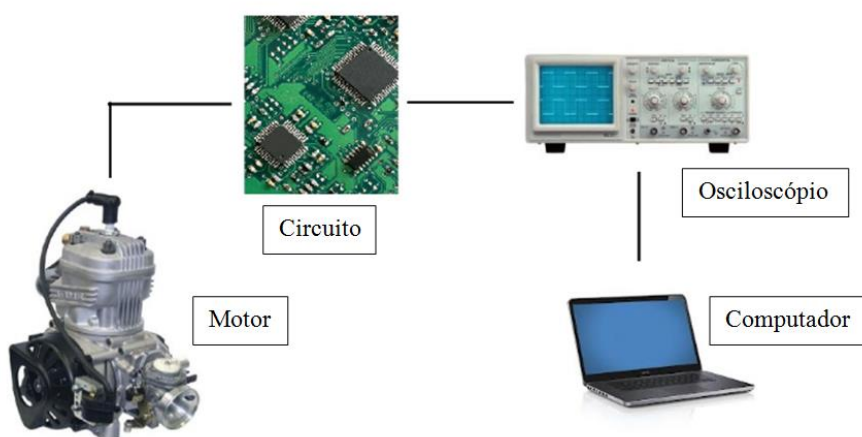


Figura 37. Diagrama esquemático do teste de aquisição da corrente iônica

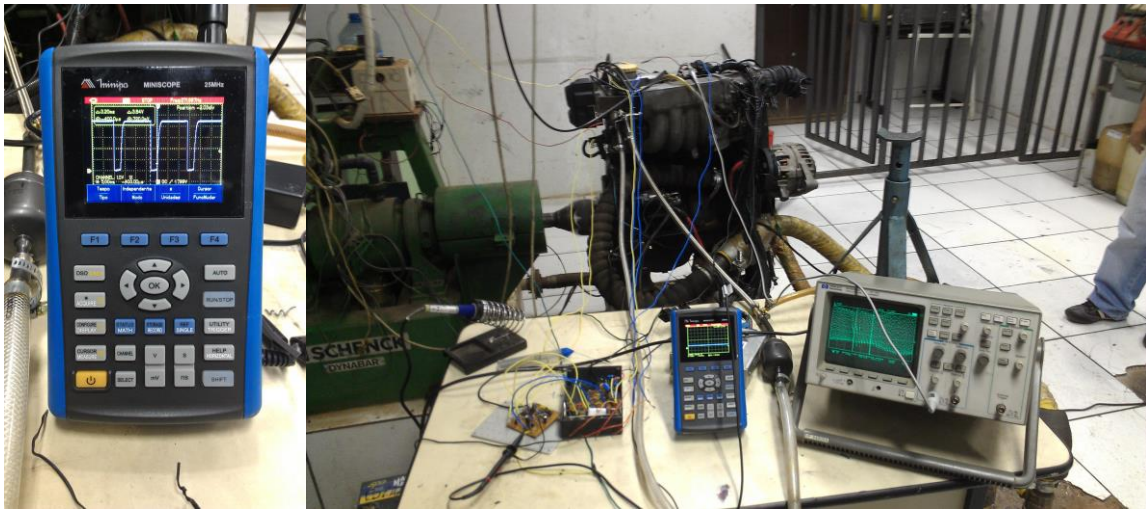


Figura 38. Osciloscópio portátil (Minipa Miniscope) para testes do sistema de ignição e bancada de testes – sala do dinamômetro, respectivamente.



Figura 39. Ferramentas utilizadas

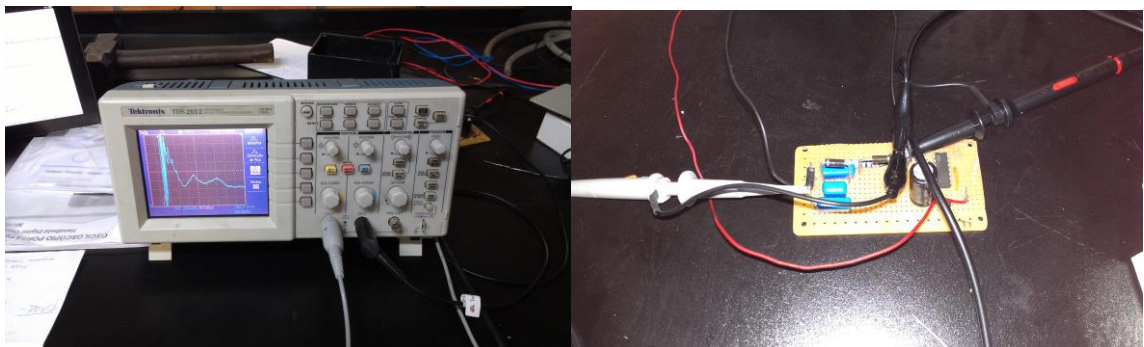


Figura 40. Bancada de testes – sala de controle

4.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios serão realizados com base na norma ISO [19] de testes de motores e feitos da seguinte maneira. Com o motor instalado, irar-se-á ligar à bobina um fio que conecta o terra do secundário da bobina de um dos cilindros a entrada do circuito de sensoramento iônico. Assim, na saída do circuito se conecta as ponteiras do osciloscópio para a aquisição da curva. Com um cabo de transmissão de dados, conecta-se a o osciloscópio a um computador, no qual se adquire os dados dos pontos das curvas. Deste modo podem-se reproduzir as curvas em softwares de tratamento de dados. Se não houver a possibilidade de se adquirir as curvas para o computador, irá se retirar fotos do display do osciloscópio e se analisará manualmente os dados.

Os ensaios devem ser realizados variando a rotação em plena carga e também variando a abertura dos eletrodos da vela de ignição (GAP). A faixa de rotação usada deve ser entre 2000RPM a 5500RPM para se analisar a variação da corrente iônica quando a carga também varia e se elegeu os GAP em três valores: 0,5mm, 1,0mm e 1,5mm. Esses valores abrangem as aberturas utilizadas em boa parte dos veículos de estrada. Assim, pode-se também analisar a influencia da abertura dos eletrodos na aquisição do sinal da corrente iônica. As aberturas foram ajustadas e calibradas com um calibre padrão nas medidas objetivadas.



Figura 41. Vela utilizada calibrada para GAP = 1mm

A partir deste ponto, realiza-se a análise dos dados, em que irá se detectar os padrões de curvas de pressão do interior do cilindro, atentando para a observação dos fenômenos de falha na combustão, ponto de ignição do motor e outros já citados anteriormente.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 AQUISIÇÕES DA CURVA DE CORRENTE IÔNICA

A aquisição da curva da corrente iônica foi realizada com o auxílio do osciloscópio utilizado. A seguinte curva foi adquirida no mesmo.

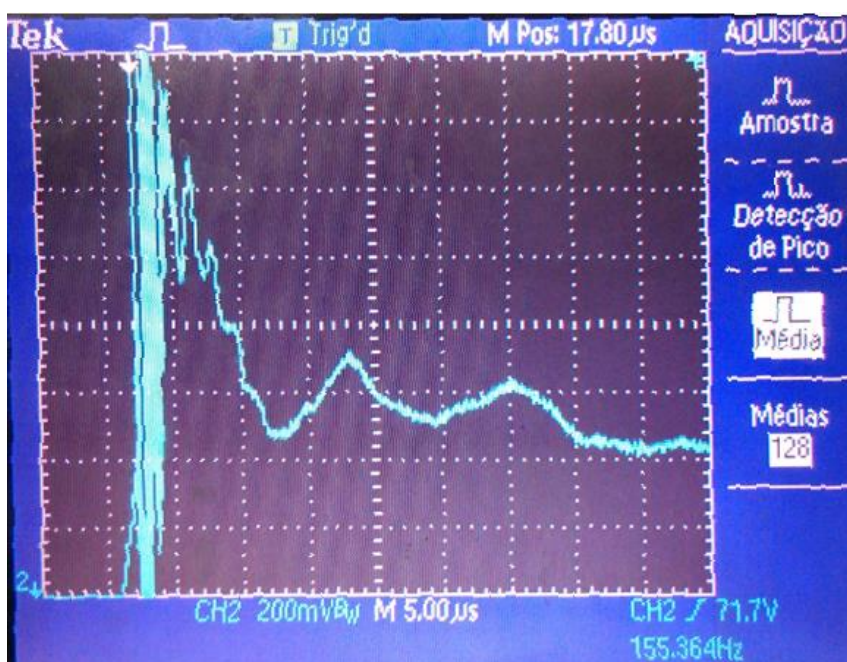


Figura 42. Curva adquirida pelo osciloscópio

A curva foi adquirida com a escala de $5\mu\text{s}$ por 200 mV na frequência de $155,364\text{Hz}$. Foi realizado um processo de filtragem de ruído da curva por um procedimento de médias que o próprio osciloscópio utiliza. Esse procedimento filtra ruídos de alta frequência e suaviza a curva de modo que ela fique mais homogênea, facilitando a visualização. Esse procedimento de filtragem foi utilizado em todos os ensaios.

Voltando um pouco na teoria exposta anteriormente, podemos observar a semelhança da curva adquirida com a curva teórica mostrada na Figura 21, podendo se identificar as 3 fases descritas (fases de ignição, frente de chama e pós frente de chama).

Pegando os pontos e refazendo o gráfico adquirido, uma análise mais quantitativa pode ser feita. Sendo assim, plotou-se os dados da curva original, gerando o gráfico abaixo.

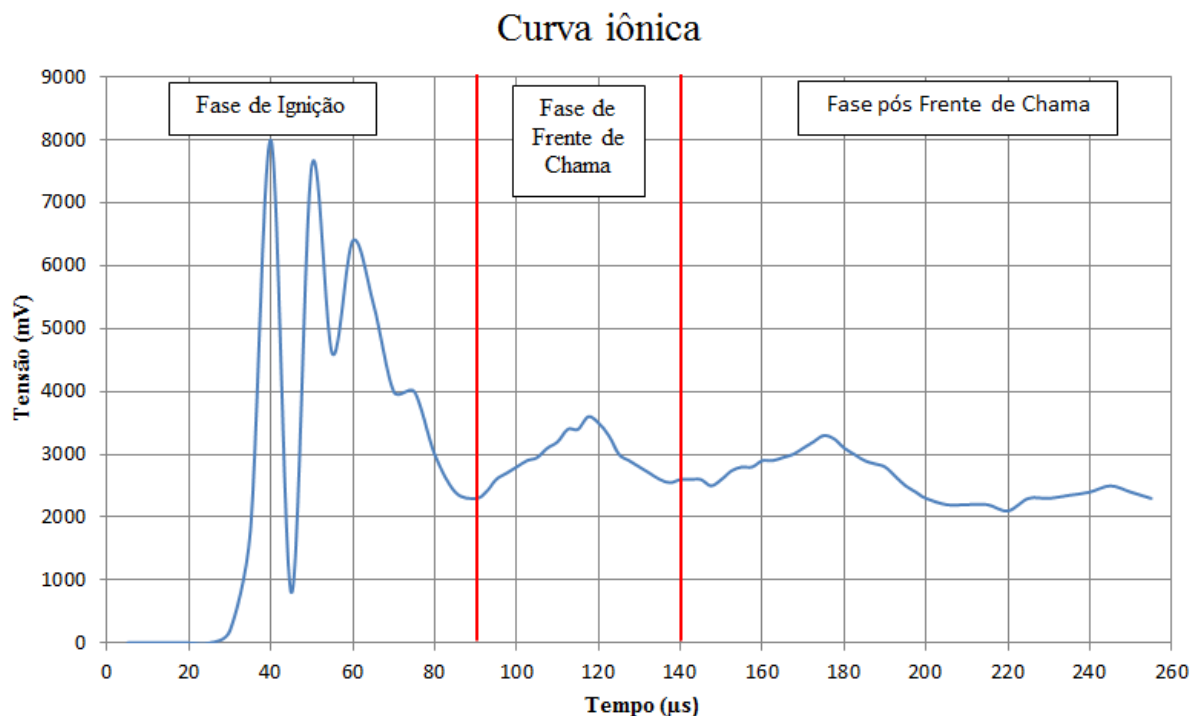


Figura 43. Curva adquirida plotada

Na curva plotada, podemos distinguir com maior precisão as fases da ignição do motor.

Na fase de ignição, devido à alta corrente medida na ignição, é observado o fenômeno de ruído oriundo da bobina. Isso acontece após a ignição, gerando picos de alta frequência e amplitudes.

As fases seguintes são onde o aparecimento de íons recebe uma atenção maior. Portanto sua análise, separadamente da fase de ignição, é de maior importância, visando o melhor entendimento do sinal da corrente iônica, principalmente do sinal da fase pós-frente de chama, a qual, conforme a teoria, segue o comportamento da pressão interna do cilindro.

5.2 ANÁLISE DA FASE DE FRENTE DE CHAMA

Conforme já explicado, a alta concentração de íons associados com as reações químicas na chama produz, na fase de frente de chama, um ou mais picos característicos. Como alguns os íons se recombina de forma mais rápida que outros, por serem moléculas mais estáveis, um pico aparece e decai até se estabilizar conforme os outros íons vão se recombina, gerando um tempo residual de decaimento.

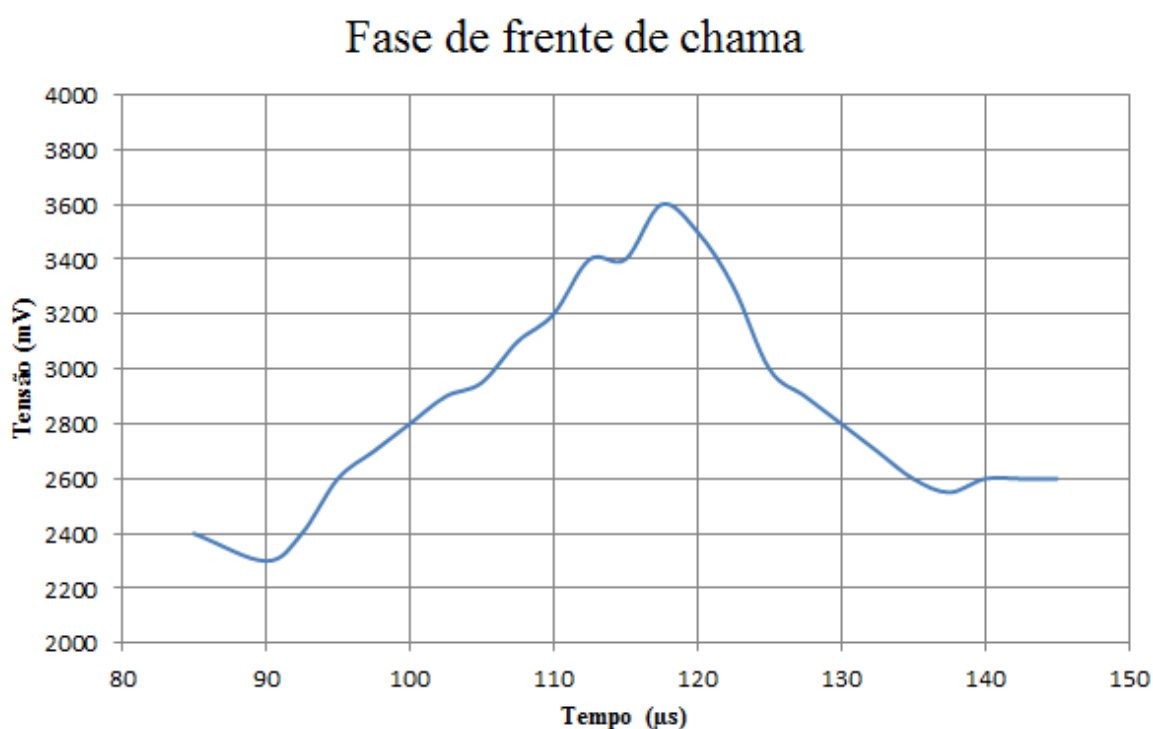


Figura 44. Fase de frente de chama da curva adquirida

Algumas características podem ser observadas como o esperado para esta fase. A ocorrência de dois picos entre 110 e 120 μs é um aspecto esperado para a curva. O seu decaimento contínuo, observado no período entre 120 e 140 μs , é um parâmetro facilmente observado. Esses parâmetros característicos, além do ruído da bobina na fase de ignição, dão maior confiabilidade a aquisição, ou seja, a curva segue o objetivo de coerência esperado da aquisição.

Conforme [9], o sinal da corrente iônica que segue o perfil de pressão interna ainda não pode ser descrito por essa fase pois os mesmos não se encontram estabilizados.

5.3 ANÁLISE DA FASE PÓS-FRENTE DE CHAMA

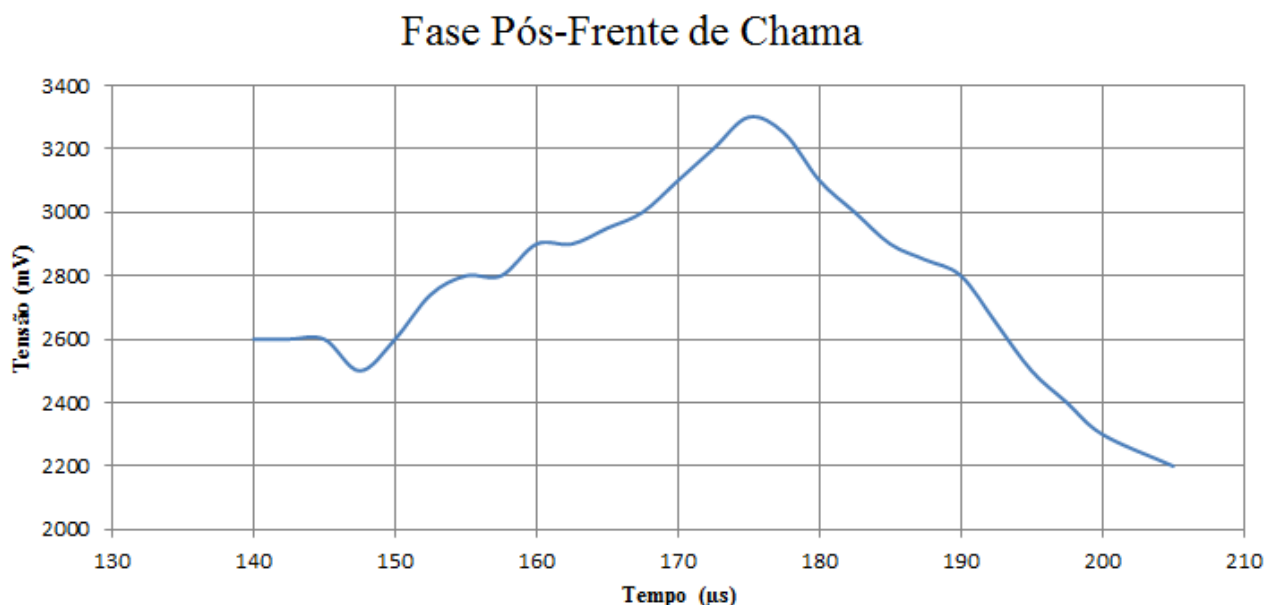


Figura 45. Fase de pós-frente de chama da curva adquirida

Em relação a esta fase, os íons mais estáveis permanecem, gerando um sinal que segue o comportamento de pressão do cilindro pelo efeito da concentração molecular. Os íons também são criados pela alta temperatura dos gases queimados. Assim, como a temperatura segue o comportamento da pressão durante a compressão dos gases queimados, a chama se propaga pelo caminho inverso. Isso significa que a combustão foi finalizada.

A fase de pós-frente de chama é a que mais interessa para a análise do comportamento da pressão interna do cilindro. Alguns parâmetros podem ser retirados dessa porção da curva.

Na fase de pós-frente de chama medida podemos distinguir alguns parâmetros de interesse. O PPP pode ser localizado facilmente no pico do gráfico mostrado a cima. O tempo de pico de pressão é localizado aproximadamente em 175 μs .

Como a pressão interna do cilindro informa o trabalho realizado pela combustão, podemos dizer que o ponto de PPP identificado é o ponto de trabalho máximo realizado pela combustão nesse ciclo de aquisição.

5.4 ANÁLISE DO SINAL ATRAVÉS DA ABERTURA DA VELA E DA ROTAÇÃO E CARGA DO MOTOR

Como determinado, o comportamento da corrente iônica foi testado a partir da variação da abertura dos eletrodos da vela de ignição (GAP) e da rotação do motor.

Com as curvas adquiridas, foram medidas tensão e tempo de pico com referência a partir do final do ruído da bobina na fase de ignição. A tensão de pico é a tensão máxima que ocorre na curva e o tempo de pico é a posição do pico de tensão em relação ao tempo. Assim para cada ciclo de testes, o procedimento de aquisição se repetiu.

Foi observado que o GAP de 0,5mm não é o ideal para a aquisição neste motor, pois a curva de corrente iônica some no momento de aquisição na faixa entre 5000 e 5500 RPM pelo fato de haver a criação de ruídos de alta frequência no momento da aquisição nessa faixa de rotação.

Pode-se fazer uma relação entre o tempo de pico e o tempo de propagação da chama, pois os dois tempos devem ser o correspondentes. Então, quanto menor o tempo de pico, menor o tempo para que a chama se propague.

Foi observado que a faixa de 3000RPM, independente do GAP, foi o que teve o maior pico de tensão.

Em relação à abertura das velas foi observado que o maior pico de corrente iônica é dado pelo GAP de 1,0mm. Conforme a teoria [9], o pico de tensão está relacionado com o PPP. Assim, pode-se afirmar que na abertura de 1,0mm a combustão entregou maior trabalho útil ao motor.

Como na faixa de 3000 RPM o menor tempo de pico foi o do GAP de 1,0 mm, também se pode afirmar que a chama da combustão queimou mais rápido para essa faixa de operação.

Tabela 4. Dados do tempo e tensão de pico por rotação e GAP

	GAP 0,5mm		GAP 1,0mm		GAP 1,5mm	
RPM	Vpico (mV)	Tpico (μ s)	Vpico (mV)	Tpico (μ s)	Vpico (mV)	Tpico (μ s)
2000	27,5	12,5	33,2	14	25	12,5
2500	25	15	33	15	30	15
3000	22,5	16	33,5	12,5	32	17,5
3500	15	12,5	30	12,5	25	12,5
4000	15	7,5	32,5	12,5	22,5	12,5
4500	25	15	33	10	20	10
5000	---	---	32,5	10	25	7,5
5500	---	---	25	10	25	10,5

Foi realizada a média aritmética dos dados de pico coletados e calculado o desvio padrão das aquisições por RPM, com o intuito de ver dispersão da série de dados em relação à média.

É perceptível que a maior tensão de pico média e o menor tempo de pico médio se encontram para o GAP 1,0mm. Isso, além de confirmar a afirmação anterior, quer dizer que, em média, o motor funcionando com o GAP de 1,0mm fornece maior trabalho útil e a chama proveniente da combustão (frente de chama) se propaga com maior velocidade. Também é observado que o menor desvio padrão tanto para a tensão quanto para o tempo foram no GAP 1,0mm. Isso quer dizer que a aquisição para essa abertura é de melhor confiabilidade em testes para o motor ensaiado, já que o desvio padrão é o menor para os dois parâmetros.

Tabela 5. Dados médios do tempo e tensão de pico e desvios padrão de cada faixa de aquisição por GAP

	GAP 0,5mm		GAP 1,0mm		GAP 1,5mm	
	Vpico (mV)	Tpico (μ s)	Vpico (mV)	Tpico (μ s)	Vpico (mV)	Tpico (μ s)
Média	21,66	13,083	32,44	12,062	25,56	12,25
Desvio Padrão	5,400617249	3,088958832	2,87423903	1,916796	3,83067972	3,070598

Abaixo, também se encontram os gráficos separados da tensão de pico em função da rotação e do tempo de pico em função da rotação com as médias plotadas para cada abertura da vela em cada gráfico objetivando mostrar o comportamento da tensão e do tempo para cada abertura, comparando com a sua média.

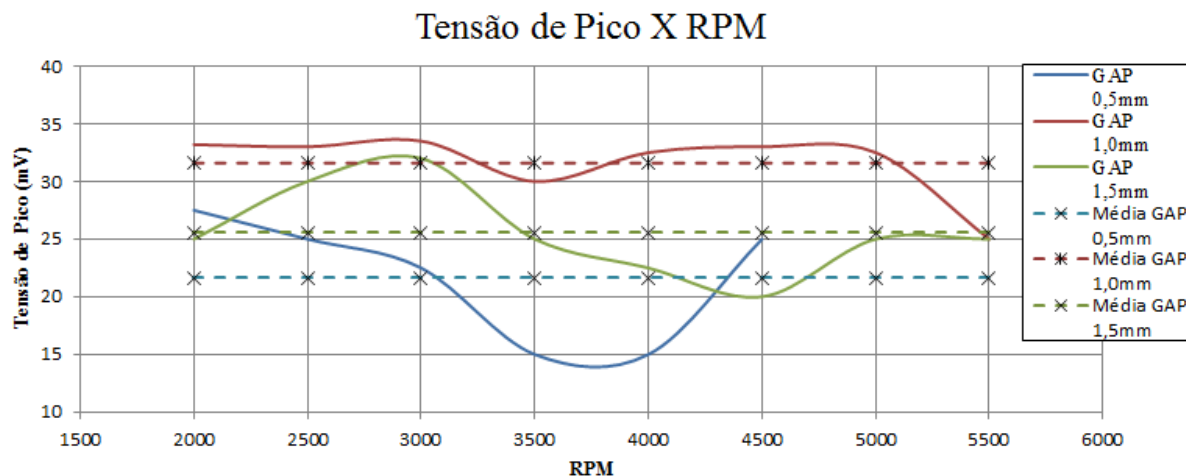


Figura 46. Gráfico Tensão de Pico X RPM

O gráfico de tensão apresenta um comportamento diferente para cada abertura, o que é de total razão quando lembramos que o pico de tensão tem relação com o comportamento da pressão interna do cilindro. Então, pode-se inferir que para cada abertura da vela, a pressão interna varia de comportamento.

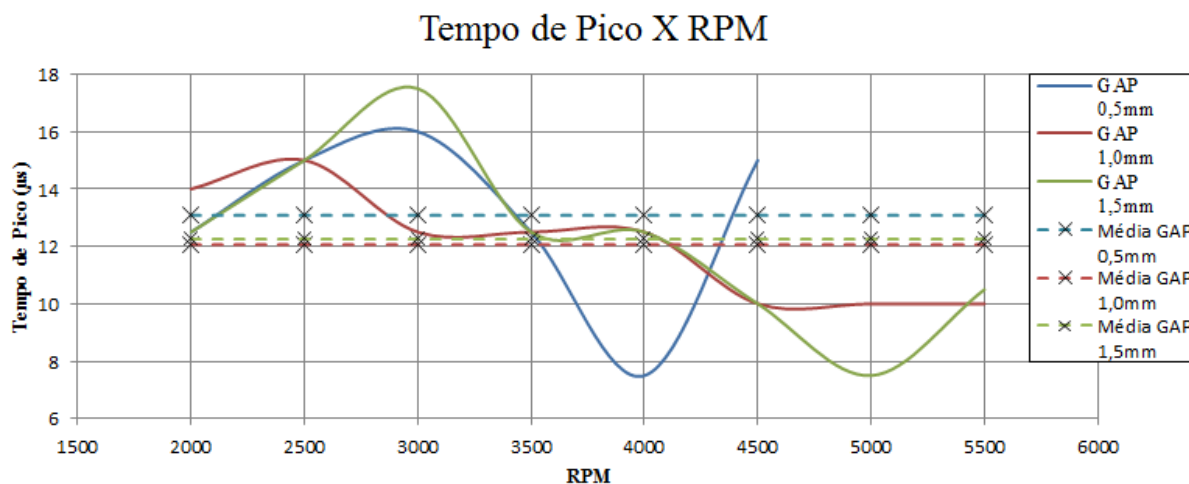


Figura 47. Gráfico Tempo de Pico X RPM

Para o gráfico de Tempo de pico em função do RPM, observa-se um comportamento parecido em algumas curvas em certos pontos de RPM. As curvas de GAP 0,5mm e 1,5mm se comportam de maneira parecida em rotações em até 3500 RPM. A partir de 3500 RPM até 4500 RPM, as curvas de GAP 1,0mm e GAP 1,5mm agem com o comportamento próximo. Voltando na tabela 4, observando os dados, podemos averiguar a afirmação acima.

Também foi observado nos testes que o torque máximo em todos os três GAP's analisados foi encontrado na faixa dos 3000RPM. O gráfico e a tabela abaixo mostram essa faixa de torque máximo.

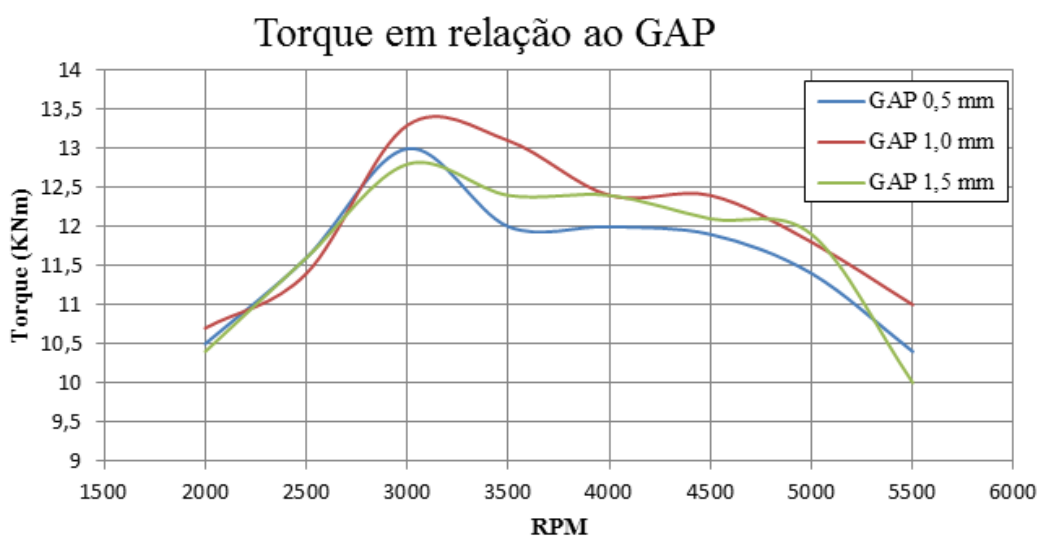


Figura 48. Curva característica de torque para cada GAP

Tabela 6. Dados de torque por RPM e GAP

RPM	GAP 0,5mm	GAP 1,0mm	GAP 1,5mm
2000	10,46	10,66	10,5
2500	11,6	11,46	11,66
3000	12,8	13,22	12,76
3500	12,12	13,16	12,7
4000	11,98	12,38	12,42
4500	11,74	12,32	12,02
5000	11,42	11,82	11,92
5500	10,46	11	10,42

A partir destes dados coletados, pode-se inferir que para o caso das curvas adquiridas e para o caso do motor analisado, o pico do sinal de corrente iônica coincide com a faixa de torque ótimo do motor, que foi na faixa de 3000RPM, independente do GAP das velas.

Também se pode inferir que, pelos dados adquiridos, o GAP de 1,0mm foi o mais adequado para o motor, pois tanto o pico de tensão quanto o pico de torque foram maiores para o GAP analisado. Além disso, a menor média de tempo de pico se encontra também para o GAP de 1,0mm, o que indica uma velocidade de frente de chama maior para esse GAP.

Esse comportamento comprova que existe uma relação entre torque, rotação e tensão do sinal da corrente iônica adquirida pelo sistema desenvolvido.

Já a respeito somente do sinal de corrente iônica, um parâmetro interessante dos ensaios de aquisição da curva de corrente iônica foi à relação entre os picos da fase de frente de chama e da fase de pós-frente de chama. Foram observados que ambos os picos aumentam e reduzem a sua amplitude proporcionalmente. Ou seja, quando o pico de uma fase aumenta, o da outra fase segue o mesmo comportamento.

6 CONCLUSÃO

A tecnologia de corrente iônica está presente a pelo menos 26 anos quando se fala em sistemas de controle de motores de combustão interna, gerando um meio de monitorar o processo de combustão, inclusive por malhas fechadas. Durante vários anos, pesquisadores vêm aprimorando esta técnica de monitoramento através de desenvolvimentos tanto de modelos físicos, quando em hardware para a aquisição do sinal da corrente iônica, aumentando a compreensão do comportamento interno do cilindro de motores de combustão interna.

O trabalho aqui descrito tem como objetivo interpretar o sinal da corrente iônica em função dos fenômenos da combustão que ocorrem internamente no cilindro de um motor de combustão interna. Portanto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto e uma revisão de conceitos técnicos de boa parte dos componentes, teorias e conceitos que englobam o projeto. Todo um aparato de pesquisa foi montado em forma de bancada de testes com os componentes necessários para a aquisição dos dados. Além da construção da bancada, o hardware de aquisição foi simulado e montado, encontrando-se pronto para os testes quando necessário.

Além do trabalho desenvolvido, houve um trabalho paralelo de adaptação e validação de um sistema de ignição para o motor, que o convertia do sistema de centelha perdida para o de centelha fasada. Esse trabalho se deu necessário para se alcançar a aquisição do sinal de corrente iônica em somente um cilindro de um motor 4 cilindros.

Após um logo processo de instalação, adaptação, ajuste e validação, surpreendentemente, o sistema forneceu características de melhor estabilidade para o motor, provavelmente implicando em um rendimento volumétrico otimizado, logicamente influenciando quantitativamente no consumo do motor. Essa informação não foi validada pelas experiências, mas que futuramente pode ser de fácil aquisição e análise.

Quanto aos procedimentos de testes, determinou-se que, além de somente se adquirir o sinal da corrente iônica, se analisaria a influência da variação dos parâmetros de rotação e de abertura dos eletrodos da vela de ignição, assim os relacionando juntamente ao sinal.

O sinal da corrente iônica foi adquirido de forma consistente pelo circuito desenvolvido, sendo observado via osciloscópio, e sua validação foi dada de forma quantitativa e qualitativa no que tange a análise nodal da curva, conseguindo se identificar todas as fases da curva conforme a teoria estudada.

Os testes variando a rotação do motor e a abertura dos eletrodos das velas ofereceram resultados interessantes. Foi observado que o comportamento da tensão de pico caminha em paralelo com o torque do motor, sendo averiguado que o pico máximo de tensão ocorre na mesma faixa de torque máximo, usando a rotação como referência.

Para caso do motor testado, foi observado que o GAP ótimo dos três testados foi o de 1,0mm. Essa afirmação foi comprovada analisando a curva de torque e os valores de tensão de pico juntamente com os de tempo de pico. A curva de torque alcançou valores maiores quando comparada as curvas com o GAP 0,5mm e GAP 1,5mm e a tensão máxima de pico foi a maior com o menor tempo de pico. Isso significa que o trabalho gerado pela combustão foi maior com esse GAP e que sua combustão ocorre no menor tempo por causa da relação entre tempo de propagação de chama e tempo de pico do gráfico de corrente iônica.

Também foi averiguada a qualidade da aquisição através das aberturas das velas testadas. Foi constatado que a abertura de 0,5mm não foi totalmente adequada para a aquisição, pois, em regimes de rotação entre 5000 e 5500 RPM a queima da vela se torna muito rápida, efeito causado pela distância dos eletrodos, ou seja, a centelha é liberada por um curto período de tempo, gerando um ruído de alta frequência na aquisição e impossibilitando a análise nessa faixa.

Por último foi observado uma relação entre as fases de frente de chama e de pós-frente de chama. Foi observado que as duas fases são proporcionais, ou seja, quando um pico de tensão cresce em uma fase, na outra fase também há o acréscimo. Isso provavelmente se dá pelo fato de os íons se organizarem de maneira similar nas duas fases, sendo mais estáveis na fase de pós-frente de chama do que na fase de frente de chama. Por isso a diferença de amplitudes nos picos das fases. Provavelmente esse comportamento também está relacionado com o grau de ionização o limite de ionização da combustão do combustível utilizado, sendo uma análise interessante para o futuro.

Por falta de equipamentos de precisão, como osciloscópio com interface USB para a aquisição de dados e um sensor de pressão adequado e de fácil acesso, não se pode validar o

sinal de pressão juntamente com o sinal da corrente iônica, sendo mais um dado que pode ser de interessante análise para outros experimentos de continuidade do projeto.

A falta desses equipamentos geram informações com uma precisão não tão boa quanto se estivessem sendo utilizados. Entretanto, algumas sugestões podem ser feitas para melhorar a qualidade do sinal. No circuito de aquisição da corrente iônica, se utiliza um diodo zener de 80V posicionado na parte anterior a “Vion 1” e em paralelo com um capacitor. Sua função é de regular a tensão em regime de condução inversa, protegendo o circuito de picos inesperados. Mas, esse diodo pode estar segurando muita a tensão de retorno, causando interferência no sinal quando em relação a amplitude. Equiparando-se a tensão do capacitor ($\pm 300V$) com a tensão do diodo zener, pode-se alcançar uma curva mais precisa do que a adquirida. Sugere-se, então, utilizar um diodo zener de 200V ou maior, seguindo a tensão que o capacitor suporta.

Outra sugestão é a de se utilizar o sinal do sensor de rotação de forma a se referenciar a curva com o ponto morto superior e com o chaveamento das bobinas. Assim, teremos um parâmetro de referência para o sinal recebido de maior precisão, facilitando a análise nodal da curva e, posteriormente, facilitando a sincronização do sinal de pressão interna com o sinal da corrente iônica.

Acredita-se então que os resultados deste trabalho possam ajudar a compreensão do comportamento interno da combustão em motores de combustão interna, possibilitando pesquisadores a utilizar a análise para realizar a construção de modelos físicos para corrente iônica e para a combustão com maior precisão, já que curvas experimentais serão dispostas para avaliação dos mesmos. Também irá possibilitar a criação de sistemas de interpretação de dados da combustão e realizar a administração controlada da mesma, algo necessário para a evolução do projeto de motores quando se envolvem os parâmetros de eficiência e emissões de poluentes, ambos os assuntos em pauta no cenário técnico global.

Bibliografia

- [1] Einewall, P., Tunestal, P., Johansson B., 2003, The Potencial of Using the Ion-Current Signal for Optimizing Engine Stability – Comparisons of Lean and EGR (Stoichiometric) Operation, *SAE Technical Paper 2003-07-0717*, Society of Automotive Engineers
- [2] Hellring, M., Holmberg, U., 2003, An Ion Current Peak-Finding Algorithm for Pressure Peak Position Estimation, *SAE Technical Paper 00FL-587*, Society of Automotive Engineers
- [3] Glavmo, M., Spadafora, P., Bosch, R., 1999, Closed Loop Start of Combustion Control Utilizing Ionization Sensing in a Diesel Engine, *SAE Technical Paper 1999-01-0549*, Society of Automotive Engineers
- [4] Piock, W. F., Weyand, P., Wolf, E., Heise, V., 2010, Ignition Systems for Spray-Guided Stratified Combustion, *SAE Technical Paper 2010-01-0598*, Society of Automotive Engineers
- [5] James, J., Chen, R., Turner, J., 2010, Ionisation and Ionisation Rate of a Two-Stroke HCCI Engine Fuelled with E85 for Control Feedback, *SAE Technical Paper 2010-01-1247*, Society of Automotive Engineers
- [6] Malaczynski, G. W., Baker, M. E., 2003, Real-Time Digital Signal Processing of Ionization Current for Engine Diagnostic and Control, *SAE Technical Paper 2003-01-1119*, Society of Automotive Engineers
- [7] Nielsen, L., Eriksson, L., 1998, An Ion-Sense Engine Fine-Tuner, *IEEE No 0272-1708/98*, Institute of Electric and Electronic Engineers
- [8] Byttner, S., Holmberg, U., 2008, Closed-Loop Control of EGR Using Ion Currents, 27th LASTED International Conference.
- [9] Eriksson, L., 1999, Spark Advance Modeling and Control, *Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation No.580*, Linköping University, PhD Thesis
- [10] Andersson, I., 2002, Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines, *Linköping Studies in Science and Technology. Thesis No.962*, Linköping University, PhD Thesis
- [11] Johansson, M., 2005, Ion Current Interface, *Linköping Studies in Science and Technology – LITH-ISY-EX-ET—05/0314—SE*, Linköping University, PhD Thesis
- [12] Huang, Y., 2004, In-cylinder Ion Sensing Opportunities, *Designing Electronic Powertrain Controls Symposium, May 4-6, 2004, Austin, Texas*, Southwest Research Institute
- [13] Herning, G. R., 2007, Singh Groove Concept – Combustion Analysis using Ionization Current, Auto Tronixs, LLC
- [14] Vartiovaara, V., 2002, DIY ion sensing ignition subsystem

- [15] Moura, M., Silva, J. A., Pau, F. S., Santos, A. M., 2009, Estudo das oscilações da pressão no interior do cilindro em um motor de combustão interna sob diferentes condições operacionais, *Minerva*, 5(3): 323-329, Pesquisa e Tecnologia Minerva
- [16] Junior, D. P. O., 2004, Motores de Combustão Interna, FATEC – SP
- [17] Delphi Automotive PLC, 2012, Delphi Ionization Current Sensing Ignition Subsystem
- [18] Delphi Automotive PLC, 2012, Ignition Systems
- [19] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010, Veículos Rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva, *NBR ISO 1585*.
- [20] Heywood, J. B., 1988, Internal combustion engines fundamentals, McGraw-Hill, First Edition
- [21] Stone, R., 1999, Introduction to Internal Combustion Engines, SAE – Society of Automotive Engineers, Third Edition
- [22] Heisler, H., 1995, Advanced engine technology, SAE – Society of Automotive Engineers, First Edition
- [23] Bosch, 2005, Manual de Tecnologia Automotiva, Editora Edgard Blücher, 25^a edição
- [24] Martins, J., 2011, Motores de Combustão Interna, Publindústria, Terceira Edição
- [25] Bosch, 2013, Catálogo de sistemas de ignição
- [26] NGK, Catálogo de Velas de Ignição Especiais
- [27] Eriksson, L., 1998, Spark Advance Control by Ion-Sensing and Interpretation, Linköping University
- [28] Saitzkoff, A., Reinmann, R., Berglind, T., Glavmo, M., 1996, An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor, *SAE Technical Paper No 960337*, Society of Automotive Engineers

Aluno: Roberto Aliandro Varella

Matrícula: 10/47787

Contatos:

Email: ravarella@gmail.com

Telefone: +55(61)8111-8095

